



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI - UNIVATES
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DE REGIÕES COM POTENCIAL DE
APROVEITAMENTO SOLAR E IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS PARA
IMPLANTAÇÃO DE UMA USINA SOLAR FOTOVOLTAICA NO RIO
GRANDE DO SUL**

Cezar Augusto Machado

Lajeado, novembro de 2017

Cezar Augusto Machado

**AVALIAÇÃO DE REGIÕES COM POTENCIAL DE
APROVEITAMENTO SOLAR E IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS PARA
IMPLANTAÇÃO DE UMA USINA SOLAR FOTOVOLTAICA NO RIO
GRANDE DO SUL**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II, do Curso de Engenharia Ambiental, da Universidade do Vale do Taquari UNIVATES, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Ms. Rafael Rodrigo Eckhardt

Co-orientador: Prof. Dr. Guilherme Garcia de Oliveira

Lajeado, novembro de 2017

RESUMO

O Brasil recebe diariamente quantidades significativas de radiação solar, o que lhe confere grande potencial para o aproveitamento desta fonte para geração de energia elétrica, por meio de sistemas fotovoltaicos. Dentre as vantagens da energia solar fotovoltaica destaca-se o baixo impacto ambiental, alta disponibilidade do recurso natural, bem como o aspecto renovável desta fonte. Apesar do potencial, essa tecnologia ainda é pouco aproveitada dada a incipiência desta fonte e pela indisponibilidade de linhas de transmissão de energia elétrica nas regiões com alta capacidade. O presente trabalho objetivou realizar uma análise multicriterial para identificar o potencial de energia fotovoltaica no Rio Grande do Sul, indicando as áreas mais aptas para a localização e realizar o dimensionamento de uma usina solar fotovoltaica. Foram utilizados os dados de radiação solar disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de todas as estações meteorológicas do Estado, gerando dados de radiação no plano inclinado para cada estação com o auxílio do *software* Radasol 2. Os índices de irradiação solar no Estado verificados ficaram entre 4,29 kWh/m².dia⁻¹ e 5,26 kWh/m².dia⁻¹. Por meio da interpolação por Curvatura Mínima (*Spline*) elaborou-se o mapa de radiação solar do Estado. Para a geração dos mapas de aptidão ambiental foram utilizados os mapas de irradiação onde os índices foram superiores a 5,18 kWh/m².dia⁻¹, aliado a mapas de aspectos geomorfológicos e infraestrutura e, com auxílio de ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), aplicando lógicas de mapas como método *fuzzy* e a avaliação multicritério *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Por meio dessas avaliações, localizou-se 43 áreas consideradas de maior aptidão, totalizando 1.210.893,75 hectares. Destas foram escolhidas três, maiores de 60 hectares, que foram avaliadas, propondo-se uma usina solar fotovoltaica com auxílio do *software* Sunny Design, realizando a avaliação de rendimento e produção geral de energia. Verificou-se a produção média anual de 48.649,59 MWh, representando 0,16% da demanda Estadual de energia elétrica. A região apontada com maior aptidão possui áreas aptas para a implantação de usinas solares fotovoltaicas capazes de atender até 87,01% da demanda elétrica do Rio Grande do Sul, demonstrando o grande potencial desta fonte para a matriz elétrica estadual e do País.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica. Geotecnologias. Energias renováveis

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Participação das fontes de energia na matriz energética nacional	16
Figura 2 - Participação das fontes de energia na matriz energética do Rio Grande do Sul	17
Figura 3 - Mapa do Sistema Interligado Nacional.....	25
Figura 4 - Matriz elétrica brasileira em 2016	28
Figura 5 - Matriz elétrica do Rio Grande do Sul	29
Figura 6 - Órbita da Terra em torno do sol durante o ano	34
Figura 7 - Variação do ângulo solar azimutal e zenital ao meio dia do equinócio em função da latitude	35
Figura 8 - Sistemas de seguimento solar de um (a, b) e dois (c) eixos	36
Figura 9 - Componentes da radiação solar	38
Figura 10 - Heliógrafo Stokes-Campbell	38
Figura 11 - Piranógrafo	39
Figura 12 - Piranômetro fotovoltaico	39
Figura 13 - Piranômetro termoeletrico	39
Figura 14 - Piroheliômetro montado em um rastreador solar	39
Figura 15 - Mapa de irradiação solar global do Brasil	41
Figura 16 - Efeito fotovoltaico em uma célula.....	43
Figura 17 - Esquema dos componentes de um módulo fotovoltaico	45
Figura 18 - Comportamento da corrente e tensão em módulos em série e paralelo	46
Figura 19 - Característica da curva $I \times V$ e ponto de máxima potência	47
Figura 20 - Comportamento $I \times V$ de acordo com a temperatura e irradiação em um módulo fotovoltaico	48
Figura 21 - Inversor do tipo string.....	51
Figura 22 - Inversor central de 500 kW de potência	51
Figura 23 - Componentes de um SIG.....	53
Figura 24 - Estruturas de informação de um SIG	54
Figura 25 - Diferenças nos resultados de irradiação utilizando diferentes metodologias	59
Figura 26 - Localização do estado do Rio Grande do Sul	62
Figura 27 - Síntese da classificação climática do Rio Grande do Sul	67
Figura 28 - Consumo de energia elétrica no Rio Grande do Sul	69
Figura 29 - Fluxograma das etapas do trabalho.....	70

Figura 30 - Mapa da rede de estações meteorológicas do INMET	71
Figura 31 - Gráfico de distribuição de valores pela lógica fuzzy.....	79
Figura 32 - Mapas de horas de sol mensal	91
Figura 33 - Mapa de irradiação solar no plano inclinado - média anual	93
Figura 34 – Mapa de localização das áreas com os maiores índices de irradiação. .	94
Figura 35 - Mapa da infraestrutura elétrica do Rio Grande do Sul	95
Figura 36 - Mapa de aptidão para o parâmetro irradiação solar.....	97
Figura 37 - Mapa de aptidão para o parâmetro declividade	98
Figura 38 - Mapa de uso e cobertura do solo (E) e aptidão deste parâmetro (D)	99
Figura 39 - Mapas de distância (E) e de distância de linhas de transmissão (D)	100
Figura 40 - Mapa de distância (E) e aptidão por distância de cidades (D)	101
Figura 41 - Mapa de distâncias (E) e de aptidão por distância de rodovias (D)	102
Figura 42 - Mapa de distâncias (E) e aptidão por distância de recursos hídricos ...	103
Figura 43 - Mapa final de aptidão de áreas	105
Figura 44 - Mapa final e infraestrutura básica	106
Figura 45 - Área “A” considerada apta	107
Figura 46 – Áreas “B” e “C” consideradas apta	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Extensão das linhas de transmissão da Rede Básica.....	26
Tabela 2 - Escala de importância	57
Tabela 3 - Relação das estações meteorológicas com dados avaliados.	72
Tabela 4 - Classes de declividades do terreno.....	81
Tabela 5 - Tabela de índice de consistência aleatória	84
Tabela 6 - Irradiação solar no plano inclinado.....	88
Tabela 7 - Análise da declividade da região.....	97
Tabela 8 - Usos do solo	98
Tabela 9 - Importância de cada atributo.....	104

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Órgãos e respectivas atribuições no setor elétrico brasileiro	21
Quadro 2 - Equipamentos para medir a radiação solar	38
Quadro 3 - Matriz AHP utilizada com as seis variáveis utilizadas	83
Quadro 4 - Mapas mensais de irradiação solar no plano inclinado	90
Quadro 5 - Variabilidade da irradiação solar mensal.....	92
Quadro 6 - Matriz AHP preenchida	104

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS.....	13
2.1 Objetivo geral.....	13
2.2 Objetivos específicos	13
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
3.1 A energia e o desenvolvimento da sociedade	14
3.2 Energias renováveis	17
3.3 Setor elétrico brasileiro	19
3.3.1 Leilões de energia	23
3.3.2 Sistema interligado nacional	24
3.3.3 Matriz elétrica	26
3.4 Energia solar.....	31
3.4.1 Geometria solar.....	33
3.4.2 Radiação solar	36
3.4.3 Potencial solarimétrico	40
3.5 Energia solar fotovoltaica.....	42
3.5.1 Painéis solares fotovoltaicos	45
3.5.2 Inversores fotovoltaicos.....	50
3.6 Sistemas de informações geográficas	52
3.7 Informações meteorológicas.....	58
4 METODOLOGIA	61
4.1 Caracterização da área de estudo	61
4.1.1 Localização da área de estudo	61
4.1.2 Hidrografia.....	63
4.1.3 Clima	65
4.1.4 Infraestrutura de transportes	68

4.1.5 Geração de energia elétrica	68
4.2 Métodos	70
4.2.1 Identificação de áreas mais aptas	71
4.2.2. Interpolação de dados.....	75
4.2.3. Localização das áreas de maior aptidão	78
4.2.4. Áreas de restrição e agregação de fatores	84
4.2.5 Projeto da usina solar fotovoltaica.....	85
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	88
5.1. Mapas de irradiação solar no plano inclinado	88
5.2. Avaliação de aptidão de áreas.....	94
5.2.1 Avaliação ponderada de fatores.....	103
5.3. Resultado do projeto da usina solar fotovoltaica	109
6. CONCLUSÕES	111
REFERÊNCIAS.....	113

1. INTRODUÇÃO

A demanda crescente por energia de qualidade para o desenvolvimento das atividades humanas desencadeou o consumo desordenado de recursos naturais, muitos deles não renováveis. Os principais recursos explorados e utilizados como fonte de energia no mundo são os derivados de petróleo. No Brasil, igualmente, os combustíveis fósseis representam a parcela mais significativa de fonte de energia primária. Apesar disso, o modelo elétrico nacional, baseado, na sua parcela mais significativa, em recursos hídricos, é considerado um dos mais limpos e renováveis do mundo (SUZIGAN, 2015).

Porém, a dependência de condições hidro climáticas favoráveis para a garantia da segurança energética, necessária para alavancar o desenvolvimento do país, é um dos principais desafios para o setor elétrico brasileiro. A diversificação da matriz elétrica, inserindo fontes consideradas não convencionais, como biomassa, eólica e solar fotovoltaica, pode diminuir os riscos e melhorar ainda mais a confiabilidade e disponibilidade de energia por meio de fontes renováveis. Além do aumento da disponibilidade elétrica, e diversificação das fontes de geração, outro fator importante a ser destacado é a redução da pressão e dos impactos ambientais gerados a partir da implantação das usinas hidrelétricas (TIEZZI, 2015). Nesse tocante, a energia solar fotovoltaica possui papel significativo, visto que o Brasil possui condições climáticas favoráveis para a inserção desta fonte na sua matriz elétrica. Outro fator considerável é o fato de o País dispor de uma complexa e robusta rede de transmissão e distribuição, facilitando o intercâmbio de energia elétrica entre as regiões, onde as usinas hidrelétricas, térmicas, eólicas e solar se complementam (PERAZA, 2013).

Trata-se de uma fonte renovável, silenciosa, sem emissão de gases, vapores ou qualquer tipo de poluente durante sua produção, sendo que a geração de energia solar fotovoltaica contribui para reduzir a emissão de poluentes atmosféricos gerados por fontes não renováveis e, até mesmo, por algumas renováveis (BARBOSA FILHO, et al., 2015). Aliadas a isso, as usinas solares fotovoltaicas podem ser instaladas em locais com maiores demandas energéticas, descentralizando os polos geradores e reduzindo os impactos ambientais associados (BARROS, 2014).

Para a habilitação e instalação de usinas solares fotovoltaicas, diversas pesquisas devem ser realizadas, assim como o atendimento de pré-requisitos técnicos, ambientais e econômicos pré-determinados. Além de dados de radiação solar, informações a respeito de tipo de terreno, topografia, disponibilidade e distâncias de subestações de energia elétrica, vias de acesso e recursos hídricos, projeção de custos de instalação e manutenção e licença ambiental do órgão competente, são informações indispensáveis (EPE, 2016).

O principal fator a ser observado quando da intenção do aproveitamento é a avaliação do potencial solar, por meio da análise da radiação solar incidente no local proposto. Assim, além da radiação, informações como temperatura ambiente e velocidade dos ventos são aspectos que interferem no aproveitamento da energia solar fotovoltaica (NOVAK, 2016).

A utilização de geotecnologias, como os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), aliados aos dados climáticos locais, facilitam na escolha das áreas mais adequadas, mapeando os locais com maior potencial para implantação das usinas. Além disso, essas tecnologias de informações espaciais georreferenciadas podem ajudar a descartar locais restritos, com baixa aptidão climática ou que, por conta da falta de infraestrutura básica, torne o custo de geração de energia elétrica inviável (CARRIÓN, 2008; UYAN, 2013; SÁNCHEZ-LOZANO, et al., 2013).

Nesse sentido, a presente pesquisa se propõe a identificar as áreas que possuem as melhores condições climatológicas, técnicas e ambientais para a implantação de uma usina solar fotovoltaica (USF) no estado do Rio Grande do Sul. Além de realizar uma avaliação espacial dos dados, pretende-se gerar um estudo de viabilidade técnica da implantação da usina, com vistas à disponibilidade dessa fonte

nos leilões de Energia de Reserva por Fontes Alternativas, oferecidos pelo Ministério de Minas e Energia.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo realizar uma análise multicriterial para identificar o potencial de energia fotovoltaica no Rio Grande do Sul, indicando as áreas mais aptas para a localização e realizar o dimensionamento de uma usina solar fotovoltaica.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar, por meio de mapas, as regiões com os maiores índices de irradiação solar no plano inclinado no Rio Grande do Sul;
- Realizar avaliação multicriterial e indicar as áreas com melhor aptidão para receber uma usina solar fotovoltaica;
- Dimensionar uma usina solar fotovoltaica, vinculando com o potencial de irradiação solar e avaliar sua capacidade de produção e contribuição na matriz elétrica do Estado.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 A energia e o desenvolvimento da sociedade

As necessidades humanas por energia sempre se deram, essencialmente, na forma de alimentos. Com o decorrer do tempo e com o desenvolvimento da sociedade, além de alimentos, o homem se utilizava de fluxos naturais de energia como sol, ventos e águas, de maneira direta, sem a conversão destas em outras formas de energia (SILVA, 2015).

Com o desenvolvimento da humanidade, quantidades cada vez maiores de energia foram demandadas, tornando indispensável a busca por fontes para suprir as necessidades. A lenha foi um dos primeiros sistemas de armazenamento de energia utilizados pelo homem que, com o domínio do fogo, determinava os momentos e intensidade do uso do calor como fonte de energia (SILVA, 2015).

Após a Revolução Industrial, o uso do vapor, gerado através da queima do carvão mineral, em substituição à lenha, impulsionou a economia mundial e fez com que uma sociedade altamente dependente de recursos energéticos se desenvolvesse (FARIAS; SELLITTO, 2011). De acordo com Suzigan (2015), a utilização do petróleo e seus derivados, em substituição ao carvão mineral, se deu de forma natural, face à maior facilidade de transporte e versatilidade de utilização do combustível líquido.

A eletricidade, fonte de energia secundária obtida através de fontes primárias, como o petróleo e seus derivados, surgiu no fim do século XIX e trouxe consigo vários benefícios, tanto para o setor industrial, quanto para o bem-estar da população. Tudo

isso por conta da facilidade de transferência da energia, por meio de fios e cabos, ao invés dos rudimentares moinhos impulsionados pelo vento ou pela água, onde a transferência da energia se dava por meio de eixos (SILVA, 2015). Por conta dessas facilidades, enquanto que nas primeiras civilizações o homem demandava cerca de 5,8 kWh/dia de energia para sobreviver, já no fim da Revolução Industrial passou a demandar 89,5 kWh/dia (SILVA, 2012).

Esse aumento na demanda recursos, provocado pelo intenso crescimento e desenvolvimento econômico na Revolução Industrial fez com que o homem buscasse por fontes de energia de forma muitas vezes descontrolada, em algumas ocasiões acarretando na degradação ambiental, provocando a geração exagerada de resíduos, poluição de rios e contaminação do solo (SUZIGAN, 2015). O motor principal desse desenvolvimento se deu utilizando, principalmente, petróleo e seus derivados como combustível.

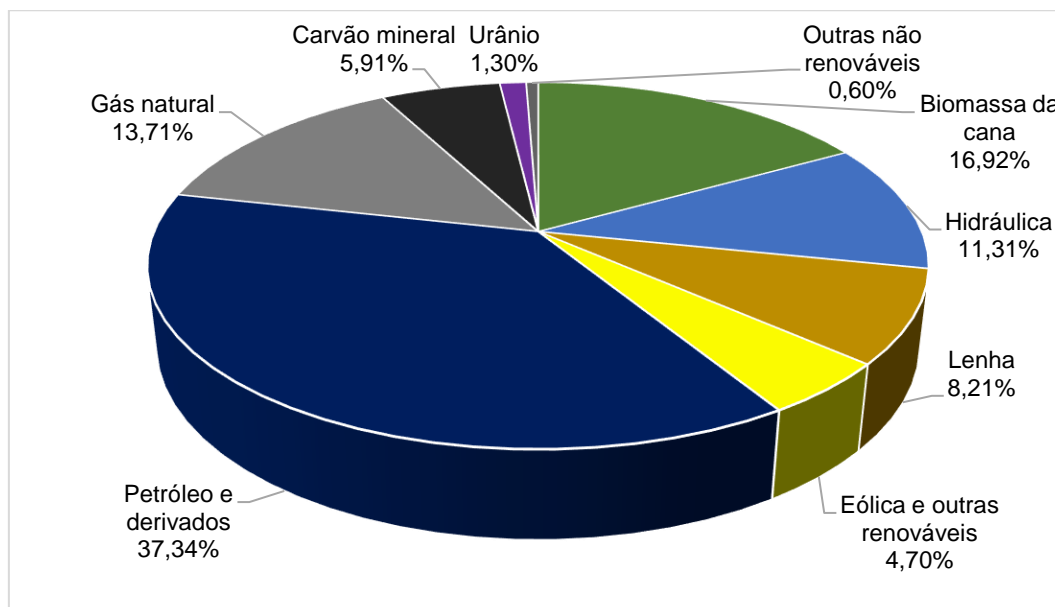
Para Santos (2010), a utilização dos combustíveis de origem fóssil se dá principalmente pelo seu baixo custo, alta disponibilidade e tecnologia para seu uso final largamente disseminada no mundo. O autor ainda trata que a lenta utilização de fontes de energias de origem renovável em muitos países se dá em especial pela disponibilidade de recursos naturais, flutuabilidade nos preços e na oferta dos combustíveis oriundos do petróleo. Além disso, Santos (2010) destaca que o desenvolvimento de novas tecnologias contribuiu para o aumento na eficiência e segurança dos equipamentos e as fontes renováveis de energia vem atraindo novos investidores, favorecendo para torná-las cada vez mais atrativas do ponto de vista econômico.

Aliado a isso, o fato de os combustíveis fósseis e de origem não renovável serem responsáveis, direta ou indiretamente, por diversos problemas ambientais em esfera global, o investimento em fontes de energias limpas e renováveis são fundamentais para a melhoria da qualidade de vida e o desenvolvimento socioeconômico sustentável das presentes e futuras gerações (KAUFFMANN, 2012; SUZIGAN, 2015).

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN), desenvolvido pela Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), no Brasil a fonte de energia primária majoritária é o petróleo e seus derivados

(figura 01), totalizando 58,8% da matriz de origem não renovável (EPE, 2016). Por outro lado, 41,2% da energia primária gerada é de origem considerada renovável, levando, assim, o país a um lugar de destaque internacional no aproveitamento de recursos naturais para fins energéticos de forma sustentável (EPE, 2016).

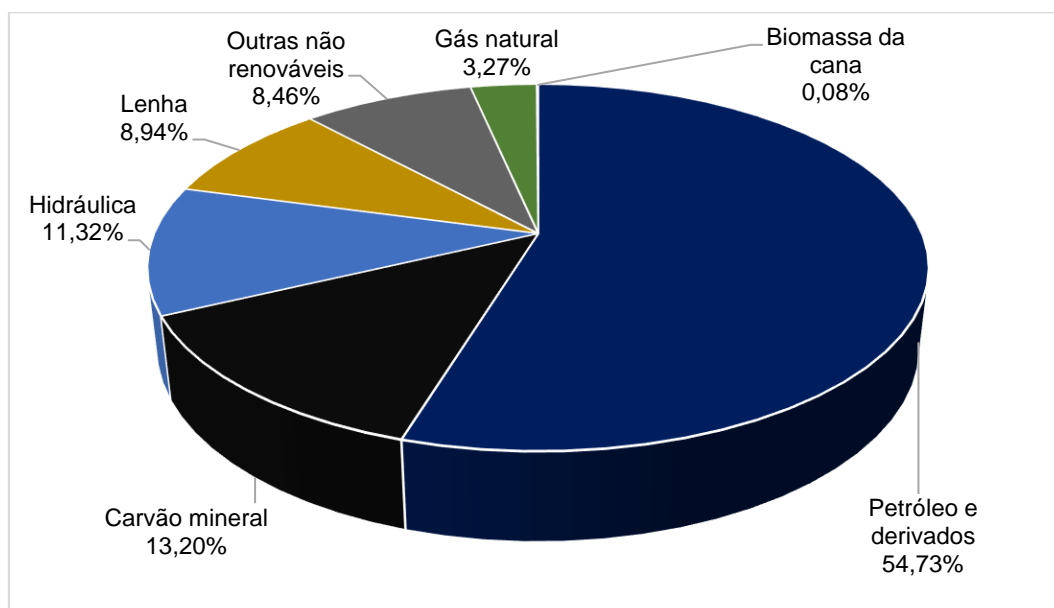
Figura 1 - Participação das fontes de energia na matriz energética nacional



Fonte: Adaptado de EPE (2016).

Já a matriz energética do Estado do Rio Grande do Sul, de acordo com o Balanço Energético do Estado do Rio Grande do Sul, desenvolvido pela Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE) aponta que 71,2% da energia primária consumida é de origem não renovável, destacando novamente o petróleo e seus derivados como constituintes principais (Figura 02). As renováveis representam apenas 28,8%, impulsionados principalmente pelas fontes de origem hidráulica (CAPELETTO; DE MOURA, 2015).

Figura 2 - Participação das fontes de energia na matriz energética do Rio Grande do Sul



Fonte: Adaptado de Capeletto e de Moura (2015).

3.2 Energias renováveis

São consideradas fontes de energias renováveis aquelas que possuem capacidade de reposição equivalentes à de sua utilização, podendo ocorrer de forma natural ou artificial. Como fontes naturais de energias renováveis têm-se a energia solar, eólica, hidráulica, biomassa e geotérmica. Considera-se fonte de energia renovável não natural principalmente a biomassa plantada e os resíduos das atividades humanas e agroindustriais como resíduos sólidos urbanos, lodos de estação de tratamento de efluentes e dejetos animais (PINHO et al., 2008). As fontes de energia consideradas não renováveis são aquelas em que sua reposição se dá em horizonte de tempo geológico (GOLDENBERG; LUCON, 2007).

Todas as formas de energias disponíveis são oriundas da radiação solar incidente na Terra. Basicamente essa radiação proporciona geração de calor, movimento das massas de ar, o ciclo hidrológico e as correntes marinhas. Pequena parcela é absorvida pelos vegetais através da fotossíntese (GOLDENBERG; LUCON, 2007).

O Brasil, com seu vasto território, imensas bacias hidrográficas e clima predominantemente tropical, dispõe de abundante potencial para exploração das energias renováveis, sendo as que oferecem maior potencial a radiação solar, o vento, a água e a biomassa (PINHO et al., 2008).

As energias renováveis podem ser utilizadas em substituição aos derivados do petróleo para a geração de energia elétrica, principalmente visando reduzir os impactos ambientais causados pelo uso de combustíveis fósseis, além de ser alternativa ambientalmente favorável, o desenvolvimento de benefícios sociais e econômicos, devido ao incremento constante do uso das renováveis no mundo, possibilitando a geração de emprego e renda (BORGES, 2017). De acordo com Goldenberg e Luccon (2007), as energias renováveis surgem como aliadas para redução da dependência dos combustíveis de origem fóssil, principais propulsores dos efeitos das mudanças climáticas e da crise ambiental.

Segundo Goldenberg (2012), os benefícios ambientais das fontes de energias renováveis vão além de reduzir a dependência dos derivados de petróleo e outras fontes convencionais. Além de emitirem menos gases de efeito estufa e poluentes convencionais, auxiliam na redução da possibilidade de falhas no suprimento de energia elétrica, bem como na geração de emprego e renda a nível local.

Para Ziles e Benedito (2012), as energias renováveis, como o caso da energia solar, não emite qualquer tipo de efluente líquido, sólido ou gasoso, tampouco ruídos e nem utiliza recursos naturais esgotáveis.

Outro atrativo para o incremento do uso de fontes renováveis no mundo é a redução dos custos tecnológicos e financiamentos governamentais, tornando-as mais acessíveis. De acordo com Borges et al. (2017), desde 2004, o crescimento na participação de energias renováveis na matriz elétrica mundial chegou a 600%, tendo como as principais fontes solar e eólica.

De acordo com Pinho et al. (2008) a ampliação do uso da energia solar e eólica representam importante avanço na minimização dos impactos ambientais provocados pela utilização dos combustíveis de origem fóssil para a geração de energia elétrica. Isso, segundo o autor, se deve principalmente ao amadurecimento da tecnologia

empregada para o uso dessas fontes, tanto para sua utilização de forma individual quanto em operações interligadas com outras fontes.

3.3 Setor elétrico brasileiro

A desverticalização do sistema elétrico brasileiro, observada a partir da privatização e segmentação em geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, ocorrida na década de 1990, proporcionou a abertura do mercado de energia elétrica no Brasil, concomitantemente com a criação de uma organização e estruturação de uma matriz elétrica brasileira (MOREIRA, 2016). Dentre as diversas alterações ocorridas no setor elétrico brasileiro, a criação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), criada mediante a Lei Federal nº 9.427/1996 teve por objetivo designá-la como agente de regulação, fiscalização e controle das atividades do setor, em acordo com as políticas e diretrizes do governo federal (WERNER, 2016).

Ainda nessa época foram criados o Mercado Atacadista de Energia (MAE) e o Operador Nacional do Sistema (ONS), pela Lei nº 9.648/1998 e pelo Decreto 2.655/1998 (DARWICHE, 2016; PERAZA, 2013). De acordo com Peraza (2013), essa estrutura possibilitou a expansão do parque gerador de energia elétrica, modicidade tarifária, por conta de estabelecimento de contratos de compra de energia elétrica de longo prazo, possibilitando também o investimento em infraestrutura.

Nesse cenário, visando o fortalecimento da estrutura do sistema elétrico e minimizar as vulnerabilidades, foi então criada a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME). Com essa estrutura criada, estabelece-se a política de planejamento de longo prazo, estudos de disponibilidade de energia de todas as fontes, além da realização de estudos na área de geração e transmissão de energia de curto prazo (ROCKERT, 2016).

Além da EPE, outros órgãos surgiram visando dar segurança no suprimento de energia elétrica, como o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE), também vinculado ao MME. Concomitante a isso, cria-se a Câmara de Comercialização de

Energia Elétrica (CCEE), responsável por organizar as atividades de comercialização de energia elétrica (PERAZA, 2013).

Além da modicidade tarifária, a garantia no suprimento de energia elétrica e de promover a inserção social da energia elétrica, por meio da universalização do acesso (PERAZA, 2013), essa estrutura permite que haja a comercialização de energia elétrica entre as distribuidoras e os consumidores livres (RCOKERT, 2016; WERNER, 2016). A criação dos Ambientes de Contratação Regulada (ACR), onde as concessionárias de geração e distribuição participam, e os Ambientes de Contratação Livre (ACL), onde as distribuidoras e consumidores livres participam, favoreceu o ambiente para a compra e a venda de energia elétrica.

Nos ACR, as distribuidoras contratam energia, independente da fonte, por meio de leilões onde vencem os lances com menor preço pela energia a ser comercializada. Já nos ACL, os consumidores livres e distribuidoras contratam a energia que necessitam diretamente dos geradores, mediante negociações reguladas (PERAZA, 2013; ROCKERT, 2016; WERNER, 2016).

Esse ambiente proporciona um conjunto de regras e metodologias de cálculos a serem aplicados visando a garantia física na geração, transmissão e distribuição, bem como o valor da energia elétrica a ser comercializada ao longo do período da vigência dos contratos firmados nos leilões, visando também detectar os desequilíbrios entre a oferta e demanda de energia (PERAZA, 2013; ROCKERT, 2016).

Vários órgãos relacionam-se entre si e são responsáveis pela composição do setor elétrico brasileiro, estabelecendo diretrizes, políticas, tendo como responsabilidades o planejamento estratégico do setor, regulação, operação e as demais premissas necessárias para a garantia do suprimento de energia elétrica do país. São os órgãos: Congresso Nacional, Conselho Nacional de Políticas Energéticas (CNPE), Ministério de Minas e Energia (MME), Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) e os agentes de geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica (MACARI, 2016; PERAZA, 2013).

Com relação às atribuições dos órgãos, as informações podem ser visualizadas no Quadro 01:

Quadro 1 - Órgãos e respectivas atribuições no setor elétrico brasileiro

Conselho Nacional de Políticas Energéticas (CNPE)	Tem por finalidade o assessoramento do Presidente da República na formulação das políticas e diretrizes em energia. Revisa também a matriz energética em âmbito estadual, visando estabelecer diretrizes específicas para cada região.
Ministério de Minas e Energia (MME)	Tem como responsabilidade a formulação e implantação de políticas públicas voltadas para o setor de energia, de acordo com as diretrizes definidas pelo CNPE. Também estabelece o planejamento de ações, visando a manutenção da segurança energética e possíveis desequilíbrios entre oferta e demanda de energia.
Empresa de Pesquisa Energética (EPE)	É responsável pela elaboração de estudos e pesquisas, a fim de dar meios para a implementação do planejamento estratégico do setor energético, apresentação do balanço energético e planos de expansão de curto, médio e longo prazo. Elabora também os estudos necessários para viabilizar a expansão da matriz elétrica.
Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE)	Acompanha de forma permanente a continuidade e a segurança do abastecimento de energia no país. É presidido pelo MME, com representantes da ANEEL, ANP, CCEE, EPE e ONS e

	<p>tem como prerrogativa o acompanhamento e desenvolvimento das atividades inerentes a geração, transmissão, distribuição, comercialização, importação, exportação, tanto de energia elétrica quanto de combustíveis, como gás natural e petróleo, bem como realizar análise periódica de segurança de abastecimento do mercado de energia elétrica, petróleo e gás. O CMSE também identifica as dificuldades, no âmbito técnico, ambiental, comercial e outros que possam afetar a disponibilidade e a expansão do setor energético.</p>
<p>Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)</p>	<p>Tem por finalidade a regulação da geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, fiscalizar os serviços e definir as tarifas, além de administrar os conflitos de interesses, garantindo a modicidade tarifária, zelando pela qualidade dos serviços.</p>
<p>Operador Nacional do Sistema (ONS)</p>	<p>É o ente que, sob a fiscalização da ANEEL, coordena e controla a operação de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN). Garante o suprimento de energia elétrica de forma contínua e ininterrupta, definindo ainda as condições de acesso à rede em todo o país.</p>

Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE)	É o responsável pela compra e venda de energia em todo o território nacional, administrando contratos, apresentando informações de balanço de compra e venda, realizando o balanço financeiro dos leilões de energia elétrica ocorridos nos mercados de curto prazo.
--	--

Fonte: Peraza (2013); Macari (2016).

3.3.1 Leilões de energia

Os leilões são a principal ferramenta para promover a expansão da oferta e garantir o atendimento da demanda por energia e, assim, seguir o planejamento estratégico de expansão da matriz elétrica. As previsões de carga do sistema devem ser informadas ao MME que, juntamente com a ANEEL, promovem os leilões para o atendimento dessas necessidades. Existem três modalidades de leilões: Leilão de Energia Nova, Leilão de Energia Existente e Leilão de Reserva, sendo que, de maneira geral, o vencedor do leilão é aquele que pratica o valor mais baixo, também conhecido como leilão reverso (BORO, 2014).

Os Leilões de Energia Nova são promovidos anualmente, sendo denominados A-5 ou A-3. Os leilões A-5 são aqueles que ocorrem cinco anos antes da entrada em operação da usina e o leilão A-3, três anos antes. Os leilões A-5 são realizados para a comercialização de energia oriunda de grandes usinas, comumente hidrelétricas ou térmicas de grande capacidade. Já os leilões A-3 são voltados para empreendimentos menores, como pequenas centrais hidrelétricas (PCH), usinas eólicas, solar, biomassa e outras fontes que necessitem de um tempo menor para sua implantação (BORO, 2014).

Por sua vez, os Leilões de Energia Existente normalmente ocorrem um ano antes da data prevista para a entrega da energia, chamados também A-1. Esses

leilões também são utilizados para desfazer distorções ou atender a demandas alheias ao gerenciamento do sistema (BORO, 2014).

Já os Leilões de Reserva são realizados pela ANEEL de forma direta ou indireta, visando garantir a continuidade e a segurança no fornecimento de energia elétrica. Nesses leilões, empreendimentos já vencedores em outras modalidades podem se credenciar e, potencialmente fornecer energia ao SIN, desde que a capacidade de geração contratada em ambos os leilões seja possível de ser entregue ao sistema (BORO, 2014).

Os Leilões de Energia de Reserva (LER) para a contratação de energia por fonte fotovoltaica iniciaram-se em 2014 e, desde então foram realizados três certames, um em 2014 e outros dois em 2015. Todos eles em ambiente ACR, A-3. O primeiro LER, que contou com comercialização de energia solar fotovoltaica ocorrido em 2014, homologou 331 projetos, totalizando 1.048,2 MWp, a um custo médio de R\$ 215,12/MWh (EPE, 2014).

O primeiro leilão de 2015 habilitou 341 projetos, totalizando 1.043,7 MWp, a um custo médio de R\$ 301,79/MWh (EPEa, 2015). Já o segundo LER em 2015 habilitou 493 projetos, totalizando 1.115,9 MWp, a um custo médio de R\$ 297,75/MWh.

3.3.2 Sistema interligado nacional

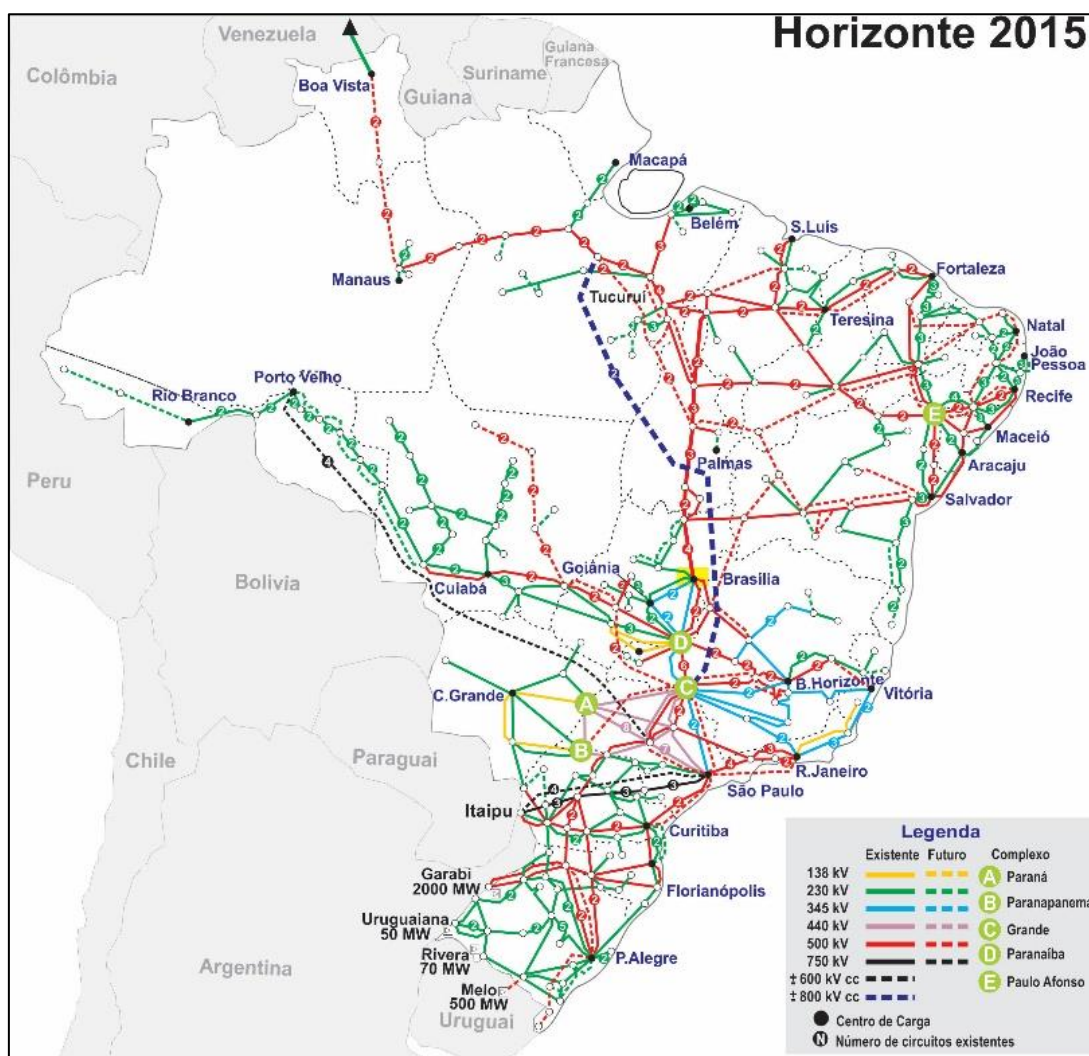
Devido à dificuldade no armazenamento em sua forma fundamental, toda a energia elétrica gerada deve ser consumida no mesmo instante em que é gerada. Dessa forma, o planejamento e a coordenação entre a geração e o consumo de energia é indispensável para manter a continuidade, eficiência e qualidade no sistema elétrico (DARWICHE, 2016).

O sistema principal de geração e transmissão de energia elétrico brasileiro é constituído basicamente de um complexo hidro-termo-eólico, com usinas hidrelétricas como predominantes. Atualmente o país conta com uma capacidade de geração contratada de 152.136,88 MW, sendo 64,90% por fonte hidráulica, 26,92% de origem térmica, 6,86% eólica, 1,31% nuclear e apenas 0,02% solar fotovoltaica (ANEEL,

2017). Constituem o sistema quatro grandes subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte (ONSa, 2016).

O sistema de transmissão é composto pelas linhas de transmissão e subestações operando nas faixas de tensão de: 230 kV, 345 kV, 440 kV, 500 kV e 750 kV em corrente alternada e 600kV e 800kV em corrente contínua (PERAZA, 2013). O mapa do sistema interligado é demonstrado na Figura 3.

Figura 3 - Mapa do Sistema Interligado Nacional



Fonte: ONSa (2016).

É considerada de Rede Básica a linha de transmissão, subestação ou equipamentos que operem acima da tensão de 230kV (ONSb, 2016). A extensão das linhas de transmissão, bem como a faixa de tensão de operação da Rede Básica são demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Extensão das linhas de transmissão da Rede Básica

Tensão (kV)	Extensão da rede (km)
230	53.910,30
345	10.303,20
440	6.733,30
500	42.622,10
600	12.816,00
750	2.683,00
TOTAL SIN	129.067,90

Fonte: ONSc (2015).

3.3.3 Matriz elétrica

De acordo com Rondinelli e Da Silva (2015), o Brasil possui um dos maiores mananciais do mundo, fato pelo qual, intrinsecamente remete o país ao uso prioritário desses recursos para geração de energia. Apesar do grande potencial, a exploração desenfreada desses recursos vem causando sérios problemas ambientais e sociais, demonstrando a necessidade do emprego de fontes complementares de energia, com intuito de garantir a segurança energética do país.

Historicamente o Brasil utiliza de forma abundante os recursos hídricos como fonte de energia elétrica, visto sua alta disponibilidade e capacidade de produzir energia elétrica de forma segura. Entre as décadas de 50 e 70 o Brasil evidenciou um crescimento virtuoso na implantação de empreendimentos hidrelétricos, construídos de maneira descentralizada e distante dos centros econômicos e de consumo de energia elétrica (ETCHEVERRY, 2017; TONEZER, 2017). Até a década de 1980, os custos sociais e ambientais sempre foram desconsiderados na implantação e até mesmo para definição do valor da energia elétrica produzida (TONEZER, 2017).

De acordo com Peraza (2013), a dependência predominante de apenas uma fonte energética, mesmo que considerada limpa e renovável, por depender de condições climáticas favoráveis, pode causar riscos ao abastecimento energético. Reforça essa tese quando trata da questão do racionamento de energia elétrica

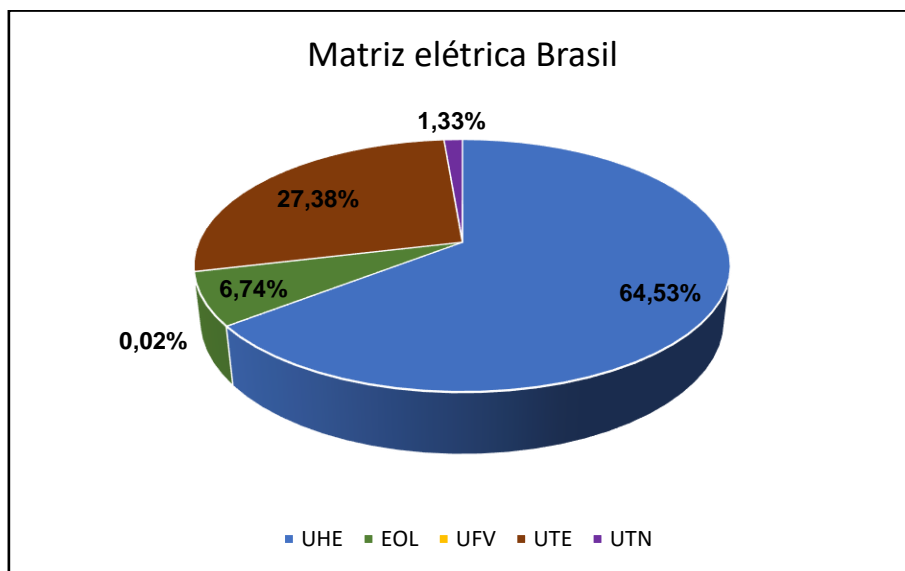
verificado no país no início dos anos 2000, freando o setor e forçando o governo federal a adotar medidas mitigadoras aos impactos econômicos negativos desse fato. Nessa época, o governo federal fomentou o uso de novas fontes de geração de energia, como as pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), usinas térmicas à biomassa de cana, assim como ao gás natural, como forma de suprir rapidamente a demanda crescente de energia. A dependência de uma matriz elétrica com predominância hidráulica demonstrou-se insuficiente para atender às demandas crescentes de energia (PERAZA, 2013; WERNER, 2016).

A diversificação da matriz energética, introduzindo-se fontes de energias renováveis, como solar e eólica, são boas opções para garantir a segurança energética em tempos de variações climáticas significativas (PERAZA, 2013; SUZIGAN, 2015; TIEZZI, 2015). As fontes de energia renovável poderão desempenhar um papel crucial no aumento da oferta de energia, devendo prevalecer sobre as demais fontes, a fim de auxiliar na disponibilidade elétrica, causando o menor impacto social e ambiental possível (SILVA, 2016).

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) (2016), desenvolvido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Brasil figura entre os países que possuem a matriz energética de fonte primária mais renováveis do mundo, com 41,2%. Apesar disso a parcela mais significativa, ou seja, 56,9% são oriundos do petróleo e seus derivados, 1,3% urânio e outros 0,6% de outras fontes não renováveis.

Com relação a matriz elétrica brasileira, a fonte hidráulica predomina, com mais de 64% de participação, seguida pelas usinas térmicas a gás natural, biomassa, derivados do petróleo, carvão, eólica, nuclear e solar fotovoltaica (BEN, 2016) A Figura 4 demonstra a parcela de participação de cada fonte no Brasil.

Figura 4 - Matriz elétrica brasileira em 2016



Fonte: BEN, 2016.

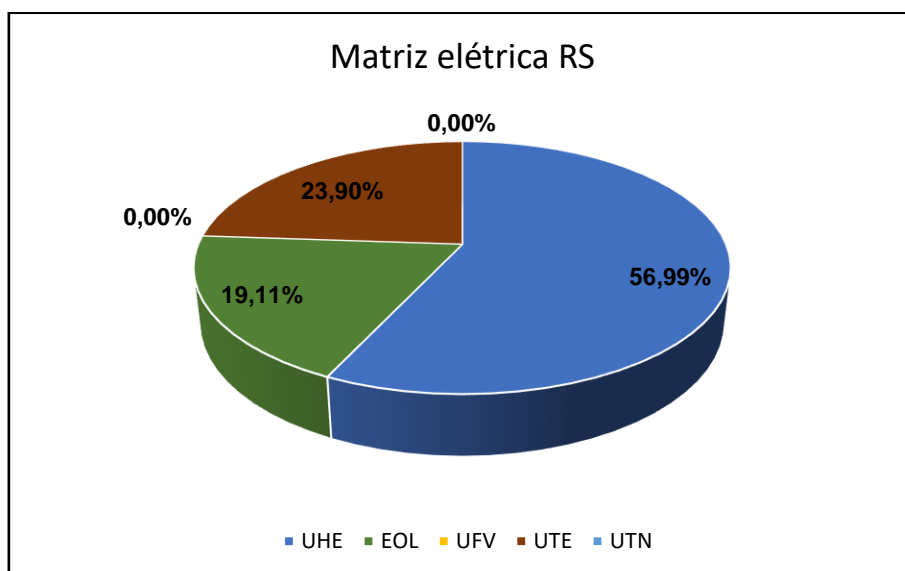
Silva (2016) destaca que a cada edição do Balanço Energético Nacional fica nítido o aumento da contribuição de fontes de energias renováveis na matriz elétrica brasileira, mesmo que esse crescimento seja inferior ao que poderia ser praticado.

O consumo de energia é considerado um dos indicadores fundamentais de desenvolvimento econômico e qualidade de vida de um país (PERAZA, 2013; POTTMAIER et al., 2013). De acordo com Silva (2016), o consumo de energia elétrica anual por habitante no Brasil gira em torno de 2.630 kWh, com uma taxa de crescimento anual de 2,5%. Segundo o autor, mesmo em períodos de recessão econômica, o consumo de energia tende a crescer com o passar dos anos, demonstrando a necessidade de um alinhamento entre as estratégias de crescimento e diversificação da oferta de energia na matriz elétrica.

No Brasil e, em especial, no Rio Grande do Sul, nota-se o crescente aumento no aproveitamento de fontes de energias renováveis não convencionais, como o caso da energia eólica, desde o ano de 2006 (CAPELETTO; MOURA, 2015). Porém, para que os investimentos nessa fonte de energia possam ser viabilizados, é necessário que exista a disponibilidade de recursos naturais, bem como a identificação dos locais com os melhores potenciais e infraestrutura necessária para o escoamento da energia gerada (VICARI, 2012).

De acordo com o Capeletto e Moura (2015), a fonte principal de geração de energia elétrica no Rio Grande do Sul é a hidráulica, com 67,8%, seguida pelo carvão mineral, eólica, óleo pesado, gás natural e biomassa. A Figura 5 apresenta a matriz elétrica do Rio Grande do Sul em 2015.

Figura 5 - Matriz elétrica do Rio Grande do Sul



Fonte: Capeletto e de Moura, 2015.

A grande dependência das usinas hidrelétricas na matriz elétrica nacional é reflexo do grande potencial hidráulico disponível no país. Para as diferentes características de recursos hídricos são empregadas, distintas tecnologias são empregadas. As usinas hidrelétricas no Brasil são divididas principalmente em duas categorias. A diferença básica entre elas está na capacidade de geração de energia, onde as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) possuem capacidade de geração de até 30 MW e as Usinas Hidrelétricas (UHE), acima dessa potência. As UHE ainda são subdivididas em usinas de acumulação e fio d'água. As usinas de acumulação são aquelas onde há o alagamento de vastas áreas, devido à instalação do barramento necessário para a acumulação de água e a água escoar exclusivamente pelas turbinas, exceto em períodos de chuva, onde escoar também pelos vertedouros ou comportas (estruturas de segurança). As usinas fio d'água não acumulam água, apesar de inundarem vastas áreas. A vazão de água no vertedouro é sempre igual ou maior a da descarga das turbinas (TIEZZI, 2015).

Apesar de ser considerada alternativa e renovável, a matriz elétrica brasileira, baseada em sua mais significativa parcela por fonte de origem hidráulica, não

necessariamente é considerada sustentável do ponto de vista ambiental. Para Malerba (2012), estudos vem contradizendo que fontes renováveis são, por si só sustentáveis. Segundo a autora, a política brasileira de ampliação da oferta de energia elétrica, baseada nos recursos hídricos, deixa as demais fontes, como solar, eólica e biomassa apenas como uma fonte complementar e abre espaço ainda para a inserção de fontes não renováveis de energia, como as derivadas de petróleo, carvão mineral e gás natural para atendimento das cargas emergenciais em momentos de picos de demanda.

De acordo com Tiezzi (2015), a atual capacidade de armazenamento de energia no país é de 275 GW mês, sendo que 65% desse potencial encontra-se em uma área de 600 km², entre os estados de Goiás, Minas Gerais e São Paulo. Além disto, o maior percentual do potencial hidráulico encontra-se na região amazônica, porém, devido às condições topográficas características da região e as restrições ambientais com relação aos tipos de empreendimentos hidrelétricos possíveis de serem instalados, sem capacidade de armazenamento de energia explorável poderá atender as demandas de energia por apenas alguns dias.

Apesar dos avanços tecnológicos dos últimos anos, a dependência de fatores climáticos para a geração de energia pode comprometer de maneira significativa o desenvolvimento do país (TIEZZI, 2015). A interligação do sistema elétrico brasileiro reduz de maneira considerável o risco de desabastecimento ou colapso de energia elétrica por intercorrências climáticas que provocam a falta de chuvas nas principais bacias hidrográficas que compõem o complexo hidrelétrico. Porém, com a grande concentração de usinas hidrelétricas, por vezes em apenas uma bacia hidrográfica, todo esse complexo estará sujeito às mesmas variabilidades climáticas (FREITAS; SOITO, 2010).

De acordo com Boro (2014) e Peraza (2013), devido às incertezas climáticas e à dependência atual de recursos hídricos para a geração de energia elétrica no Brasil, a redução da vulnerabilidade do sistema elétrico brasileiro passa principalmente pela diversificação e descentralização da matriz elétrica, incorporando, sobre tudo, fontes de energias renováveis, como a solar, eólica e biomassa.

3.4 Energia solar

Define-se o conceito de energia como a capacidade de realizar trabalho ou de transferir calor (FARIAS; SELLITTO, 2011). Compreende-se ainda que a energia é transferida e convertida, porém, nunca desaparece e possui uma quantidade constante (SILVA; VIEIRA, 2016).

O sol é a fonte primordial da energia terrestre, sendo o responsável principal por praticamente todas as formas de energias conhecidas pelo homem. Tratando-se de uma fonte virtualmente inesgotável de energia, representa uma importante opção de utilização, face às outras fontes que são, em última análise, derivadas da energia solar (PINHO; GALDINO, 2014).

A energia hidráulica, tratando-se da fonte majoritária de geração de energia elétrica no Brasil, advém da irradiação solar e da energia potencial gravitacional. De acordo com Tiezzi (2015), a ação do sol, em combinação com a força da gravidade oferecem as condições propícias para evaporação, condensação e precipitação da água. Além disso, a gravidade também atua no escoamento superficial da água e, por conta da energia cinética, proporciona o trabalho mecânico, convertido em energia elétrica por meio do gerador.

A energia eólica é proveniente da movimentação do ar na atmosfera terrestre e, da mesma forma que as outras fontes de energias renováveis, tem a ação da radiação solar como mecanismo principal. O aquecimento da superfície terrestre ocasionado pelo efeito da radiação solar somado ao movimento de rotação da Terra, proporciona o deslocamento das massas de ar. Com a menor densidade do ar quente, ele eleva-se na atmosfera. Por sua vez, as massas de ar mais frias se deslocam para áreas mais baixas, ocasionando as correntes de vento (PINHO et al., 2008). A energia cinética gerada pelo vento é convertida em energia mecânica e, por sua vez, em energia elétrica através dos aerogeradores (CUSTÓDIO, 2009).

A energia da biomassa é a energia que se origina da transformação de produtos animais e vegetais em produtos utilizados para a produção de energia, principalmente calorífica. Por meio da energia solar, as plantas realizam a fotossíntese e, assim,

assimilam os nutrientes necessários para a acumulação de carbono e outros componentes energéticos que são fixados na planta. A energia armazenada nesse processo é, posteriormente, utilizada para produção de produtos energéticos, como a lenha, biodiesel, etanol e biogás (MARCZEWSKI, 2012).

O aproveitamento da energia solar para conversão em energia elétrica é relativamente recente em comparação com as demais fontes, tendo seu início por volta da década de 1950. Para esse fim, basicamente existem duas tecnologias de conversão, distinguindo-se entre fotovoltaica, que converte a energia proveniente dos raios solares em eletricidade e a heliotérmica, que absorve a energia na forma de calor, sendo considerada uma fonte térmica de geração de energia elétrica (TOLMASQUIM, 2016).

A utilização da energia solar no mundo é considerada por muitos especialistas como uma das mais promissoras tecnologias para atender à crescente demanda por eletricidade, visto que o volume de investimentos nesse setor é um dos que mais cresce, resultando em um grande salto tecnológico e, conseqüentemente, redução de preços (SUZIGAN, 2015).

O largo desenvolvimento da tecnologia eólica tornou-a uma tecnologia altamente viável, mais barata e eficiente. Assim como as outras fontes de energia limpa, a eólica apresenta algumas desvantagens, como ser uma fonte intermitente e provocar impactos sonoros, visuais, e na população e migração de aves. A energia solar, por outro lado, é vantajosa porque não polui durante seu uso, é silenciosa, suas usinas são duradouras e necessitam de pouca manutenção (SUZIGAN, 2015).

Atualmente a energia solar é pouco representativa na matriz elétrica mundial, porém, a rápida expansão observada nos últimos anos devido, principalmente, pela alta disponibilidade do potencial solar, redução dos custos de implantação e a não emissão de poluentes faz com que, em muitos países, essa fonte de energia emergisse como uma boa alternativa para o suprimento de eletricidade (TOLMASQUIM, 2016).

O atual estado da arte da energia solar fotovoltaica proporciona uma fonte de energia segura, com boa eficiência, auxiliando na redução da possibilidade de desligamento de redes de abastecimento de energia elétrica por sobrecarga e garantia

de funcionamento de pelo menos 25 anos. Para Caterina (2015), a energia solar fotovoltaica não se estabeleceu como fonte amplamente utilizada por conta dos altos custos, interferência no sistema de gestão energético, por conta da intermitência provocada principalmente pelo sombreamento de nuvens sobre as usinas e o baixo rendimento de energia por unidade de superfície. A falta de uma indústria de equipamentos de energia solar fotovoltaica nacional consolidada também é apontada pelo autor como uma barreira a ser superada, visando a ampliação da participação dessa fonte na matriz elétrica brasileira.

Para Boro (2015), a energia solar fotovoltaica possui um importante papel para o suprimento da energia elétrica no Brasil no horário de máximo consumo, ou, horário de ponta. Segundo a autora, nos últimos anos têm-se observado o deslocamento do horário do pico de consumo de energia elétrica em diversas regiões do país do final para o meio da tarde. Nesse cenário, a energia solar fotovoltaica pode atuar como aliada para o suprimento dessa demanda, justamente no horário de maior radiação solar incidente, reduzindo, assim, a necessidade do despacho de energia oriunda de fontes mais caras.

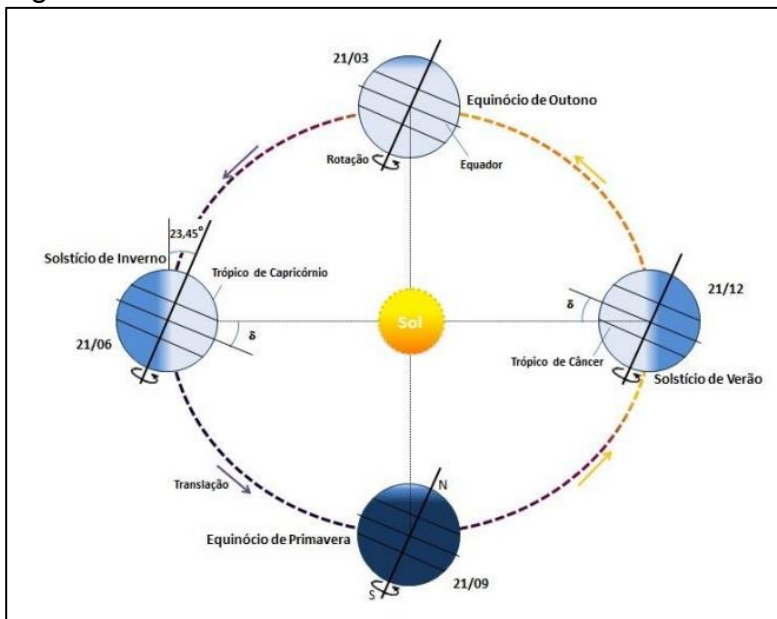
3.4.1 Geometria solar

O sol é uma estrela, que concentra a maioria, senão todos os elementos presentes na Terra. Toda a energia gerada pelo sol se dá por fusão nuclear, transformando hidrogênio em hélio, liberando, assim, grandes quantidades de energia. Apenas uma pequena parcela dessa energia liberada alcança a superfície terrestre, principalmente devido à grande distância entre o sol e a Terra (PINHO et al., 2008; NOVAK, 2016;).

O movimento aparente do sol se dá de leste a oeste, variando a duração dos dias e noites em diferentes épocas do ano, por conta dos movimentos de rotação, no qual a Terra gira em torno do próprio eixo e tem duração aproximada de 24 horas e translação, o qual o planeta gira em torno do sol, com duração aproximada de 365 dias (PINHO et al., 2008).

O movimento da Terra em relação ao sol apresenta uma inclinação de $23,45^\circ$ em relação ao próprio eixo, que, juntamente com o movimento de translação define as estações do ano. Ao se observar o movimento aparente do sol ao longo do ano, sua inclinação varia de $+23,45^\circ$ durante o solstício de inverno (normalmente próximo ao dia 21 de junho) e $-23,45^\circ$ durante o solstício de verão (por volta do dia 21 de dezembro) no hemisfério sul. A Figura 6 demonstra a posição da Terra em seu movimento em torno do sol nas diferentes épocas do ano (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 6 - Órbita da Terra em torno do sol durante o ano



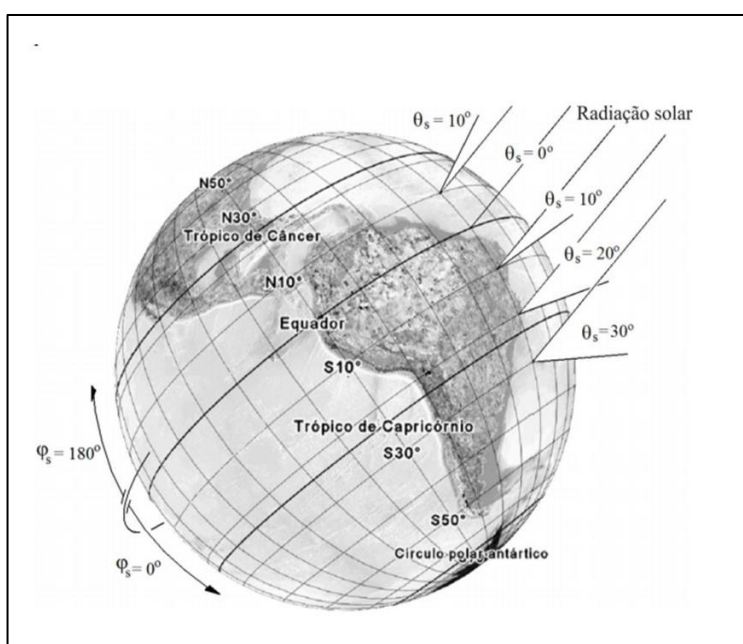
Fonte: Pinho e Galdino (2014).

Devido a essa alternância de posicionamento durante o ano, a cada instante, um mesmo local recebe diferentes quantidades de radiação. Esse movimento provoca a declinação solar (δ), que é o ângulo formado entre a linha do Equador terrestre e o Sol, que pode ser calculada utilizando-se a equação 1, onde n é o número do dia juliano, contando de 1 a 365, partindo de primeiro de janeiro até 31 de dezembro (LUCIANO, 2015).

$$\sin(\delta) = -\sin(23,45) \cos \left[\left(\frac{360}{365,25} \right) (n + 10) \right] \quad (1)$$

Os níveis de radiação solar também variam com relação ao ângulo zenital, onde a elevação solar é igual a 90° , correspondente ao Equador. Neste caso, o ângulo zenital é 0° e a diferença entre a latitude e a declinação solar é nula. Conforme se aumenta a latitude de observação, aumenta-se também o ângulo zenital, variando a inclinação dos ângulos de incidência dos raios solares na superfície, o que pode ser observado na Figura 7 (LUCIANO, 2015).

Figura 7 - Variação do ângulo solar azimutal e zenital ao meio dia do equinócio em função da latitude



Fonte: Luciano (2015).

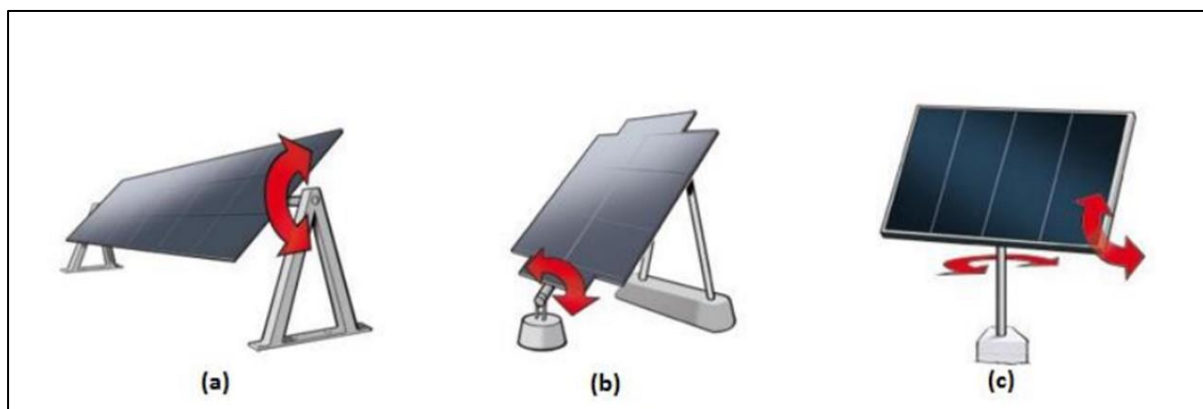
Conhecer a posição solar em cada local é fundamental para a definição da correta angulação dos painéis solares visando o melhor aproveitamento da irradiação, evitando também pontos de sombreamento. A melhor inclinação dos painéis solares depende da latitude e das condições climáticas locais (TELLO ORTIZ, 2014).

Apesar de ser considerada ideal, a inclinação do painel igual à latitude do local não é regra. De acordo com Tolmasquim (2016), mesmo em regiões equatoriais é desejável uma inclinação de ao menos 10° , a fim de evitar o acúmulo de poeira, facilitando também a limpeza dos equipamentos.

De outra maneira, o melhor aproveitamento da irradiação solar incidente pode se dar por meio de mecanismos de rastreo do sol e movimentação do conjunto de painéis solares, utilizando equipamentos específicos, com um ou dois eixos de rotação, demonstrado na Figura 8. Os ganhos na geração de energia podem variar de 20% a 50%, dependendo da localização e da tecnologia a ser empregada pelo sistema (TOLMASQUIM, 2016).

Esse tipo de sistema é predominante nos leilões de energia realizados pela EPE, representando 73% dos empreendimentos cadastrados no 2º LER/2015. Esses sistemas apresentam um fator de capacidade superior aos sistemas de suporte fixo, 27,4% contra 21,5% (EPE, 2016).

Figura 8 - Sistemas de seguimento solar de um (a, b) e dois (c) eixos



Fonte: Tolmasquim (2016)

3.4.2 Radiação solar

Radiação solar é o termo utilizado para definir o fluxo de potência emitida pelo Sol, transmitida na forma de energia eletromagnética, provendo calor e luz para a Terra (PERAZA, 2013; PINHO; GALDINO, 2014). Além disso, tratando-se de potência é denominada também como irradiância solar ou, quando unidade de medida de energia por área, denominada também como irradiação solar (PINHO; GALDINO, 2014).

De acordo com Tolmasquim (2016), a irradiação solar é aquela integrada durante o dia, medida em watt hora por metro quadrado (Wh/m^2), já irradiância solar é o que incide em uma dada superfície, por unidade de área dessa superfície, medida em watt por metro quadrado (W/m^2).

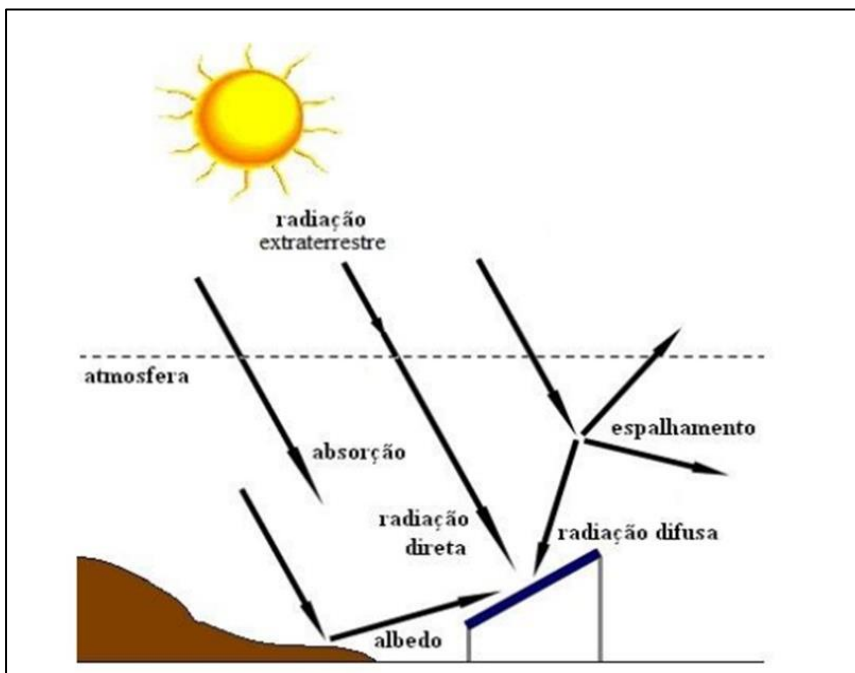
A constante solar, radiação emitida pelo Sol ao atingir a camada externa da atmosfera terrestre, possui intensidade aproximada de 1.367 W/m^2 (DUFFIE; BECKMAN, 1980).

Para Luciano (2015), a radiação solar, ao atravessar a atmosfera terrestre, é atenuada pelo espalhamento molecular, gotículas de água, poeira e outros aerossóis presentes na atmosfera, por absorção de gases e pela absorção e reflexão na superfície. A variação na absorção e espalhamento da radiação solar é variável por conta, principalmente, da dinâmica atmosférica (DUFFIE; BECKMAN, 1980).

Segundo Peraza (2013), por conta desse efeito de atenuação, a irradiância solar observada ao meio dia solar na superfície terrestre, em dias claros, sem nuvens é de aproximadamente 1.000 W/m^2 , sendo essa condição de radiação utilizada como condição padrão de testes para coletores solares.

A radiação que incide sobre a superfície é denominada de radiação direta, já a radiação que, por vezes é espalhada em todas as direções é denominada de radiação difusa (LUCIANO, 2015; PINHO et al., 2008). O albedo é o coeficiente que representa a razão entre a radiação refletida pela superfície e a radiação incidente sobre ela (PINHO; GALDINO, 2014). A radiação global corresponde à soma da radiação direta e a radiação difusa. Geralmente a radiação direta é a mais significativa, porém também é a que mais varia no decorrer do dia, muito por conta de variações de nebulosidade (LUCIANO 2015; TOLMASQUIM, 2016). A Figura 9 apresenta esses diferentes componentes da radiação solar.


Figura 9 - Componentes da radiação solar



Fonte: Pinho et al. (2008).

Para realizar as avaliações e medições de radiação incidente na Terra são utilizados equipamentos solarimétricos, que medem a incidência de radiação por unidade de área. As diferentes formas de radiação, como direta e difusa, dependendo do tipo de aparelho utilizado. Essa coleta é normalmente realizada no plano horizontal, mas também podem ser realizadas no plano inclinado (PINHO et al, 2008). Os equipamentos mais comuns utilizados são os apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Equipamentos para medir a radiação solar

<p>Heliógrafo: equipamento de funcionamento simples, responsável por medir a duração da insolação, indicando o número de horas de sol.</p>	<p>Figura 10 - Heliógrafo Stokes-Campbell</p>  <p>Fonte: Caruzzo e Nogueira (2015)</p>
--	--

<p>Piranógrafo: equipamento de funcionamento simples, que mede a radiação solar global ou difusa, de acordo com a configuração do equipamento.</p>	<p>Figura 11 - Piranógrafo</p>  <p>Fonte: Souza (2009)</p>
<p>Piranômetro fotovoltaico: equipamento eletrônico, mede a radiação global num plano horizontal, utilizado para avaliar pequenas variações na radiação incidente. Utiliza uma célula fotovoltaica como sensor e é largamente utilizado atualmente.</p>	<p>Figura 12 - Piranômetro fotovoltaico</p>  <p>Fonte: Pinho e Galdino (2014)</p>
<p>Piranômetro termoeletrico: equipamento eletrônico, mede a radiação solar global, por meio de termopares em série, variando os sensores de dois tipos: bicolores alternadamente ou com sensor totalmente preto</p>	<p>Figura 13 - Piranômetro termoeletrico</p>  <p>Fonte: Do Autor (2017)</p>
<p>Piroheliômetro: equipamento eletrônico, mede apenas radiação direta e utiliza um dispositivo de acompanhamento do Sol</p>	<p>Figura 14 - Piroheliômetro montado em um rastreador solar</p>  <p>Fonte: Do Autor (2017)</p>

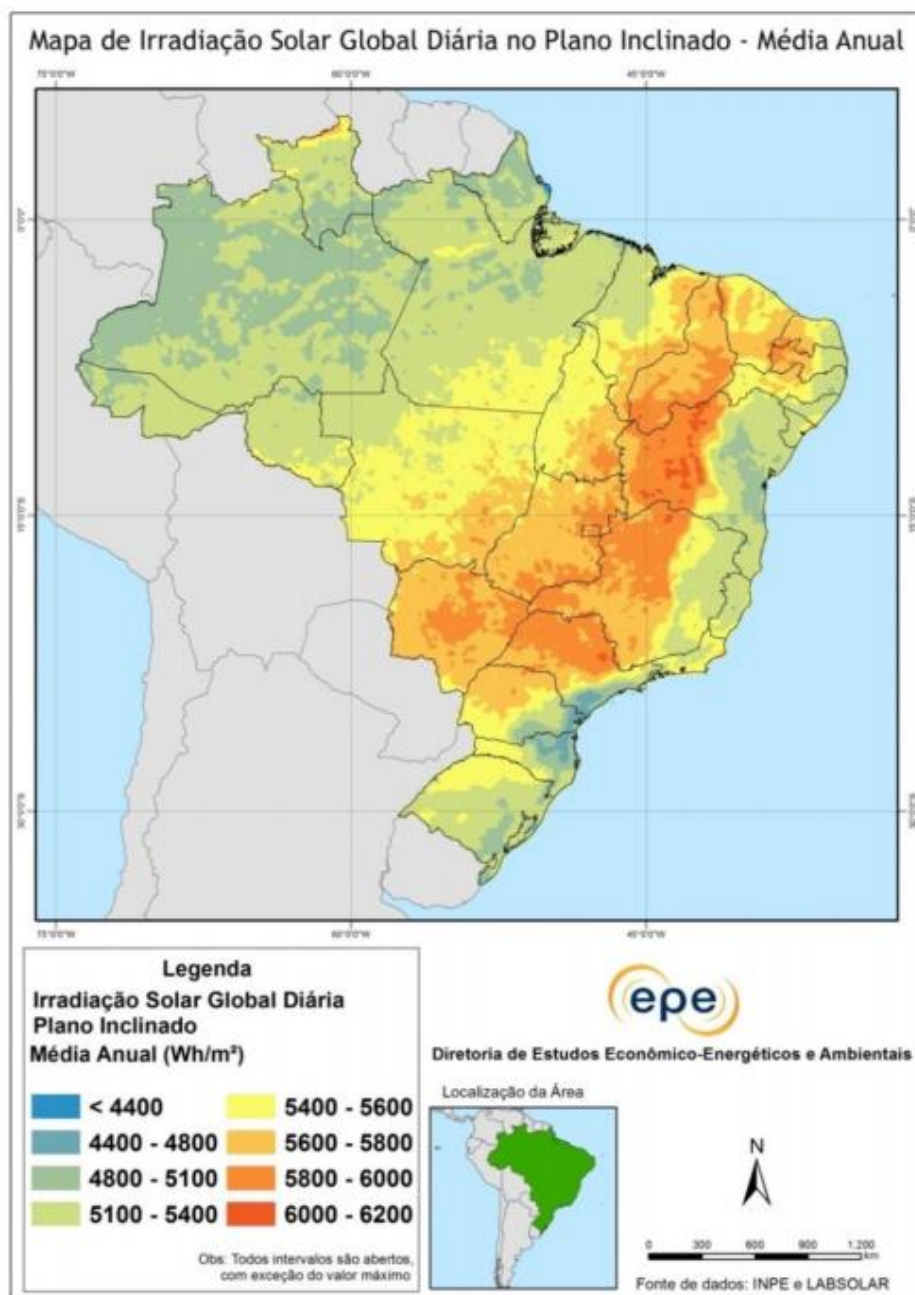
De acordo com os estudos de Trenberth, Fasullo, Kiehl (2009), considerando-se o diâmetro terrestre e a irradiância da constante solar, a potência disponibilizada pelo sol no topo da atmosfera é de aproximadamente 174 mil TW (terawatts). Levando-se em conta as perdas por reflexão e absorção geradas pelo estudo realizado, estima-se que o sol possa fornecer 94 mil TW de energia. Segundo os autores, no ano de 2011 o consumo total de energia de fonte primária no mundo foi de cerca de 143 mil TW, sendo assim, no intervalo de duas horas o sol fornece mais de 30% da energia consumida em um ano inteiro no mundo (PINHO e GALDINO, 2014). Isso demonstra o grande potencial que a energia solar tem para suprir as demandas energéticas mundiais.

3.4.3 Potencial solarimétrico

Os levantamentos de dados de irradiação solar servem como base para a preparação de mapas de potencial de geração, tendo o Sol como fonte de energia. Tolmasquim (2016) aponta que, devido ao posicionamento geográfico favorável, o Brasil possui bons índices de irradiação solar em praticamente todo seu território, mesmo em meses com baixa insolação, dando ao país condições favoráveis para o aproveitamento solar.

Pereira et al. (2006) demonstrou o potencial solarimétrico do Brasil, apontando os níveis de irradiação tanto no plano horizontal, quanto inclinado, para cada uma das regiões. Todos os estados brasileiros apresentaram índices superiores a 5 kWh/m².dia⁻¹, com destaque para as regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste, indicando níveis superiores a 5,7 kWh/m².dia⁻¹, o que demonstra o grande potencial para o aproveitamento desta fonte de energia em todo o território nacional. A Figura 15 apresenta os dados de irradiação solar no plano inclinado, gerado por Tolmasquim (2016), utilizando os dados do Atlas Solarimétrico Brasileiro de 2006.

Figura 15 - Mapa de irradiação solar global do Brasil



Fonte: Tolmasquim (2016)

De acordo com Pinho e Galdino (2014), são consideradas viáveis para a introdução de USF e o aproveitamento desta energia para a obtenção de eletricidade, regiões onde os níveis de irradiação sejam superiores a $3 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}^{-1}$, o que é facilmente notado em praticamente todo o Brasil.

Segundo Peraza (2013), os primeiros estudos voltados a elaboração de mapas do potencial de aproveitamento solar no Rio Grande do Sul datam do final da década de 1970, quando Kessler e Corbella (1979) apresentaram os mapas de irradiação solar diária total mensal sobre a superfície horizontal do Estado, utilizando dados de 25 estações meteorológicas. Já no final da década de 1980 foi lançado o Atlas Agroclimático do Rio Grande do Sul, apresentando no formato de isolinhas a radiação solar global e a insolação.

Martinazzo (2004) utilizou dados de 23 estações meteorológicas da Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e Universidade Federal de Pelotas (UFPel) para elaborar mapas solarimétricos, baseados no Método dos Mínimos Quadrados, a fim de elaborar modelos matemáticos e a estimativa de radiação solar para o Estado. O trabalho demonstrou que o Estado possui médias mensais de irradiação entre 3,9 e 4,4 kWh/m².dia⁻¹, constatando o potencial radiação solar do Rio Grande do Sul, conforme figura . Esses valores são inferiores aos observados nos empreendimentos vencedores do 2º LER/2015, realizados pela EPE, onde foram aferidos valores de irradiação global horizontal (GHI) entre 5,17 e 6,7 kWh/m².dia⁻¹ (EPE, 2016).

3.5 Energia solar fotovoltaica

Entende-se por energia solar fotovoltaica como a energia gerada através da conversão da radiação solar em eletricidade, mediante do efeito fotovoltaico. Essa conversão de energia é baseada no princípio descoberto pelo cientista francês Alexandre Edmond Becquerel, em 1839, que demonstrou em seus experimentos o aparecimento de uma diferença de potencial na estrutura de materiais semicondutores na presença de luz (PERAZA, 2013; PINHO e GALDINO, 2014; CATERINA, 2015; TOLMASQUIM, 2016).

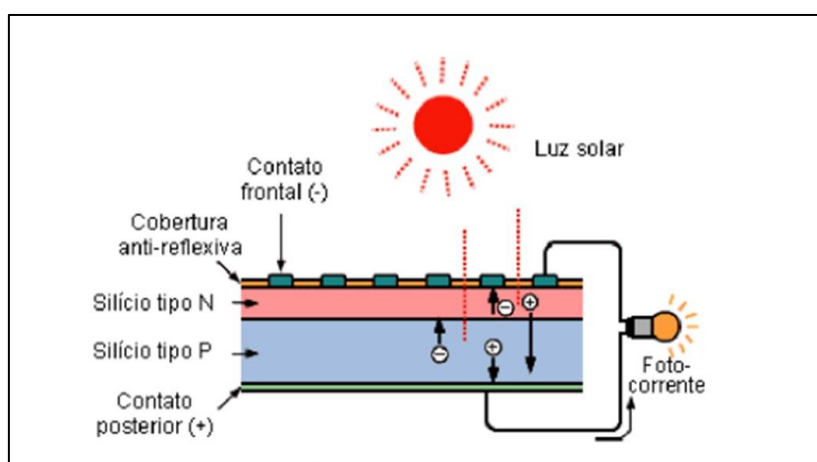
De 1876 até 1950, diversas pesquisas e experimentos foram realizados, utilizando-se distintos materiais semicondutores, obtendo-se o mesmo efeito, com diferentes níveis de eficiência de conversão, mas nunca ultrapassando 4,5%. Na

década de 1950 deu-se início a produção comercial das células fotovoltaicas fabricadas em silício, com 6% de eficiência (PERAZA, 2013; PINHO e GALDINO, 2014).

O princípio de funcionamento se baseia na teoria dos diodos de junção p-n, e os elementos utilizados, chamados de fotoelementos, que geram uma diferença de potencial nessa junção p-n, sempre em corrente contínua, quando da incidência de luminosidade (PINHO et al., 2008; PERAZA, 2013).

Os materiais semicondutores utilizados para a fabricação das células fotovoltaicas, quando purificados, possuem a banda de valência preenchida e a banda de condução vazia. Esse material recebe uma dopagem especial, conferindo-lhe a propriedade de condução da corrente elétrica (PINHO et al., 2008). O material mais utilizado para a construção das células fotovoltaicas é o silício (Si), um dos insumos mais abundantes na crosta terrestre. Além da disponibilidade, o silício purificado (Si = 99,99% a 99,9999%), caracterizado como junção do tipo p, possui 4 elétrons que podem se ligar a outros elementos, formando uma rede cristalina. Ao se adicionar a dopagem com fósforo (P), por exemplo, que possui cinco elétrons livres, haverá um elétron fracamente ligado e “sobrando”, caracterizado como junção do tipo n, permitindo que, com pouca energia esse elétron se desprenda, indo para a camada de condução (FALCÃO, 2005; TOLMASQUIM, 2016). Um esquema simplificado do funcionamento de uma célula solar fotovoltaica pode ser visualizado na Figura 16.

Figura 16 - Efeito fotovoltaico em uma célula



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

Outra técnica de dopagem comumente utilizada é utilizando materiais semicondutores com 3 elétrons livres, como o boro (B), gálio (Ga), índio (In) ou o alumínio (Al), denominados como impurezas aceitadoras de elétrons, ou junção do tipo p. Nesse caso, faltará um elétron para completar a camada de valência da ligação. Essa falta de elétron é comumente conhecida como “lacuna”. Nesse caso não haverá um deslocamento do elétron, mas sim da lacuna, proporcionando a circulação de corrente elétrica, mesmo com pouca energia empregada (PINHO e GALDINO, 2014; TOLMASQUIM, 2016).

Comumente o silício utilizado para a fabricação das células fotovoltaicas é fabricado na forma monocristalina ou policristalina, dependendo da técnica utilizada. As células monocristalinas são obtidas por meio de cilindros produzidos em fornos especiais, por meio da técnica Czochralski (Si-CZ) ou pela fusão zonal flutuante (Si-FZ, Float Zone), formando um único cristal e cortado posteriormente a uma espessura de 300 μm . Já as células de silício policristalina são produzidas pela fusão de porções de silício na forma de blocos, que são resfriados lentamente. Nesse processo, os átomos se agrupam de forma desordenada, formando pequenos cristais, com dimensões na ordem de centímetros. Por conta da tecnologia mais simplificada, as células de silício policristalinas são mais baratas que as monocristalinas (FALCÃO, 2005; PERAZA, 2013; PINHO e GALDINO, 2014).

Essas diferentes tecnologias de fabricação promovem diferentes níveis de eficiência na conversão de energia em campo. As células do tipo monocristalinas possuem eficiências que podem variar entre 15% (CATERINA, 2015), 16,5% (PINHO e GALDINO, 2014) e 20% (ANTONIOLLI, 2015). Já a policristalina possui eficiência entre 13,5% (CATERINA, 2015) e 16,2% (PINHO e GALDINO, 2014).

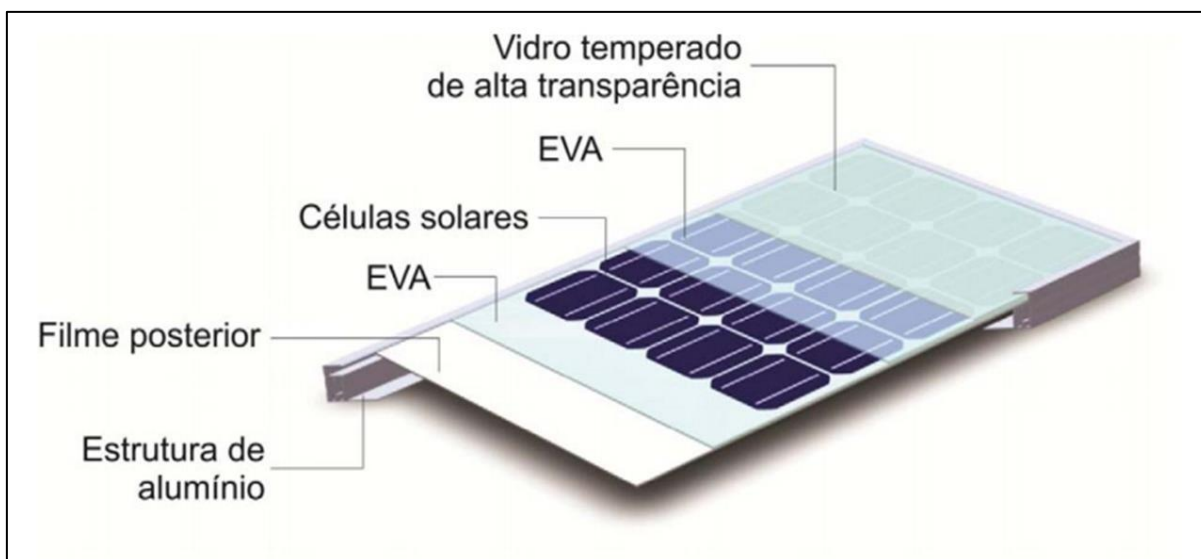
Outra alternativa de tipo de célula fotovoltaica é a de filme fino. Nessa tecnologia as células de silício amorfo são dispostas sobre estruturas de baixo custo, como polímeros, vidro e metais. Por conta da versatilidade e possibilidade de ser flexível e até mesmo translúcido, essa tecnologia tem boa aceitação no mercado, apesar da baixa eficiência observada, variando entre 5% e 10% (FALCÃO, 2005; ANTONIOLLI, 2015).

3.5.1 Painéis solares fotovoltaicos

A célula fotovoltaica é o principal elemento para a geração de energia elétrica fotovoltaica. Essas células fotovoltaicas são agrupadas eletricamente e acomodadas, formando o módulo fotovoltaico. Cada módulo fotovoltaico é constituído por um conjunto de 36 a 216 células, associadas em série/paralelo, dependendo da finalidade a que se destina (PINHO; GALDINO, 2014).

Além das células, o painel é formado pela moldura externa estruturante, normalmente em alumínio, o filme protetor abaixo das células, que serve para proteger o módulo solar de intempéries e o vidro temperado, que protege as células e os condutores, ao mesmo tempo, que permite a passagem da luz para ser convertida em eletricidade, como pode ser visualizado no esquema da Figura 17 (PINHO; GALDINO, 2014; TOLMASQUIM, 2016).

Figura 17 - Esquema dos componentes de um módulo fotovoltaico

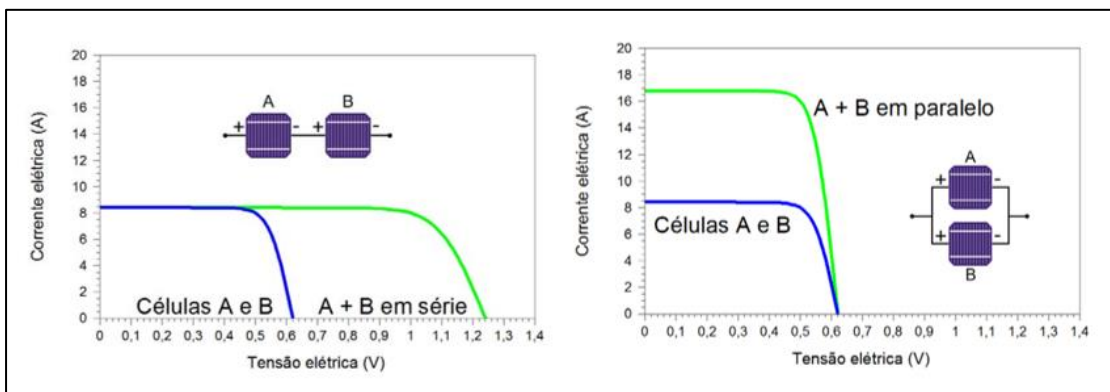


Fonte: Pinho e Galdino (2014).

A associação dos módulos fotovoltaicos em série e em paralelo permitem a formação de arranjos com tensão e corrente elétrica necessárias para as diversas aplicações possíveis. A geração de energia elétrica é feita em corrente contínua (CC), podendo ser utilizada sem a necessidade de inversores, para acumulação em baterias ou utilização direta, dependendo do dispositivo a ser utilizado. Para a utilização da

energia gerada pelos painéis em equipamentos de corrente contínua (CA) ou mesmo injeção na rede elétrica, são necessários os inversores CC/CA (TOLMASQUIM, 2016). O resultado das tensões e correntes proporcionado pelas diferentes associações dos painéis fotovoltaicos podem ser visualizados na Figura 18.

Figura 18 - Comportamento da corrente e tensão em módulos em série e paralelo

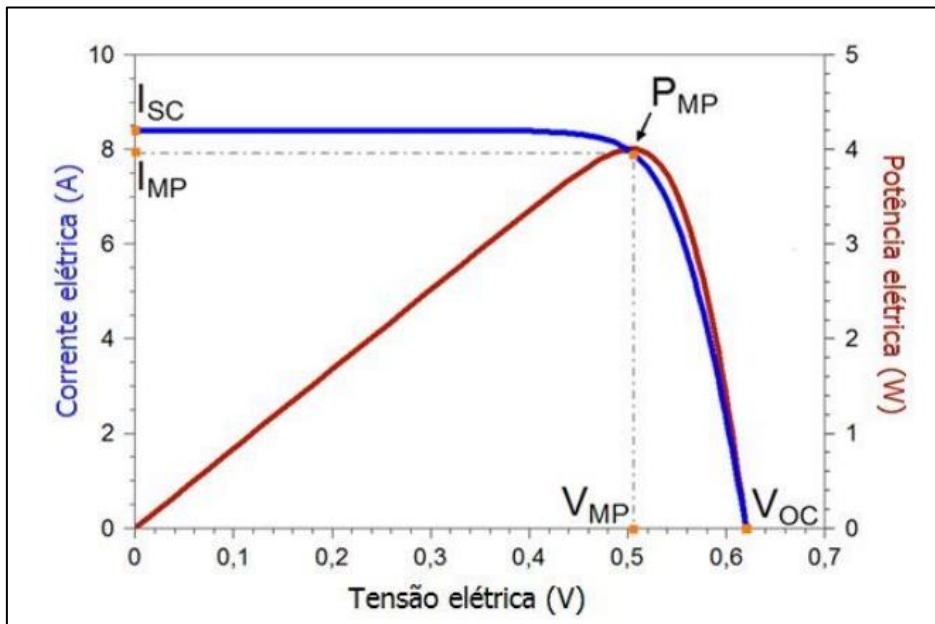


Fonte: Pinho e Galdino (2014).

O módulo fotovoltaico é identificado pela sua potência de pico (Wp), além de corrente elétrica em circuito aberto (I_{oc}) e em curto-circuito (I_{sc}), tensão em circuito aberto (V_{oc}) e em curto circuito (V_{sc}). A definição da potência de pico é feita sob condições padrão (STC - Standard Test Conditions), considerando a irradiância de 1.000 W/m^2 , sob uma distribuição espectral com massa de ar (AM) 1,5 e a temperatura da célula de 25°C (PINHO E GALDINO, 2014; CATERINA, 2015).

Como característica, o ponto de máxima potência do painel solar se dá pela relação $I \times V$, onde o ponto de inflexão da curva característica indica o ponto de maior potência do painel, o que pode ser verificado na Figura 19 (PERAZA, 2013; PINHO e GALDINO, 2014).

Figura 19 - Característica da curva IxV e ponto de máxima potência



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

Já a eficiência do painel solar fotovoltaico se dá através da relação entre potência máxima gerada sobre a irradiância solar. Nas condições STC, a irradiância utilizada é de 1.000 W/m², multiplicando-se pela área do módulo, tendo:

$$\eta = \frac{P_{mp}}{I \cdot A_M} \times 100 (\%) \quad (2)$$

Em que:

η - Eficiência do módulo fotovoltaico (%);

P_{mp} - Ponto de máxima potência do módulo (Wp);

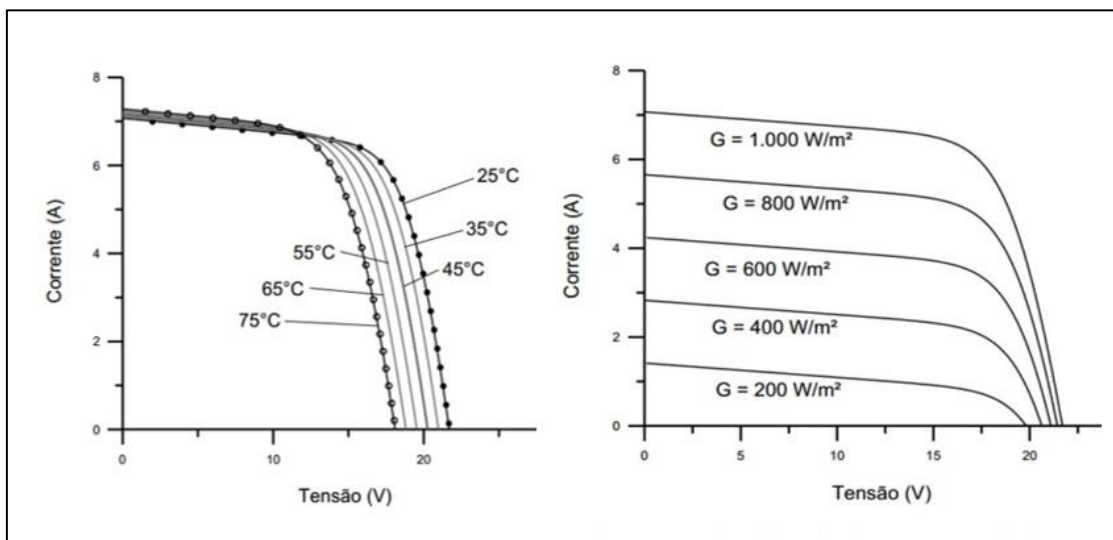
I - Irradiância solar (W/m²);

A_M - Área do módulo (m²).

A eficiência é um fator importante para se avaliar a área necessária para a geração de energia, visto que, quanto menor for a eficiência maior é a necessidade de área para atender à demanda (PINHO; GALDINO, 2014; CATERINA, 2015). Porém, a eficiência do módulo fotovoltaico não deve ser compreendida como um fator de qualidade, a menos que a área disponível para a implantação de uma usina solar seja um fator restritivo (PINHO; GALDINO, 2014).

Além das características intrínsecas dos painéis solares, outros fatores são preponderantes para a determinação do desempenho dos sistemas fotovoltaicos, dentre eles destacam-se a irradiância solar e a temperatura. A corrente elétrica produzida pelo módulo fotovoltaico aumenta conforme o aumento do nível de irradiância incide sobre as células, sem alterar de maneira considerável o nível de tensão (PINHO e GALDINO, 2014; CATERINA, 2015; NOVAK, 2016). Já com altas temperaturas observa-se redução da tensão e aumento da corrente elétrica, como pode ser verificado na Figura 20. Porém, esse aumento de corrente é insignificante, ou seja, não representa significativo aumento que compense a queda de tensão (PINHO; GALDINO, 2014). Os módulos de filme fino, que utilizam silício amorfo sofrem menos perdas de eficiência com altas temperaturas que as demais tecnologias (CATERINA, 2015).

Figura 20 - Comportamento IxV de acordo com a temperatura e irradiação em um módulo fotovoltaico



Fonte: Caterina (2015).

De forma simplificada, a fim de se avaliar a temperatura de operação de um módulo fotovoltaico pode se adotar o seguinte cálculo:

$$T_{mod} = T_{amb} + K_t \cdot I \quad (3)$$

Em que:

T_{mod} - Temperatura do módulo (°C);

T_{amb} – Temperatura ambiente (°C);

I – Irradiância incidente sobre o módulo (W/m²);

Kt – Coeficiente térmico para o módulo, podendo ser adotado o valor padrão de 0,03, se não for conhecido (°C/W.m²).

Novak (2016) realizou testes avaliando diferentes metodologias de cálculos empíricos para determinar a temperatura dos módulos fotovoltaicos, levando em consideração dados de temperatura ambiente, irradiância solar e velocidade do vento, constatando que a fórmula que apresentou os melhores resultados comparando-se com a medição de temperatura real dos painéis foi a fórmula descrita por TamizhMani et al. (2002) apud Beltrão (2008) com a seguinte equação:

$$T_{mod} = 0,943.T_{amb} + (0,028).I - (1,528)Vv + 4,3 \quad (4)$$

Em que:

T_{mod} – Temperatura do módulo (°C);

T_{amb} – Temperatura ambiente (°C);

Vv – Velocidade do vento (m/s).

Por se tratar de sistemas em associação em série, outro parâmetro que influencia a geração de energia é o sombreamento parcial ou total dos módulos fotovoltaicos. Quando há a obstrução de uma ou mais células solares, essa obstrução vai limitar a circulação de corrente elétrica naquele painel, propagando-se para os demais painéis que estiverem ligados no arranjo em série (PINHO e GALDINO, 2014). Esse sombreamento poderá causar a formação de “pontos quentes” no painel, ou seja, o superaquecimento da célula, dissipando a energia gerada pelas demais células do conjunto, causando danos ao painel inteiro (ANDRADE, 2008; CATERINA, 2015).

Segundo Caterina (2015), embora a garantia de eficiência de 80% dos painéis se esgotarem em 25 anos, isso não implica na necessidade de substituição do módulo após esse período. Apesar da degradação ser mais acelerada nos primeiros anos de

utilização do equipamento, a potência nominal é reduzida a uma taxa de 0,5% a 1% ao ano.

Os painéis fotovoltaicos utilizados nos empreendimentos vencedores no 2º LER/2015 são os que utilizam a tecnologia policristalino (76%), monocristalino (15%), com potência individual entre 295 a 335 Wp, com eficiência variando entre 15,2% e 20,3%. Também foram vencedoras usinas que utilizam tecnologia de painéis de filme fino (9%), com painéis de potência unitária de 140 Wp e eficiência de 12,9% (EPE, 2016).

3.5.2 Inversores fotovoltaicos

Para a utilização da energia gerada pelos painéis fotovoltaicos em aplicações cotidianas ou mesmo para suprir parte da demanda elétrica no SIN, é necessária a conversão da energia de corrente contínua em corrente alternada. Utiliza-se, para isto, equipamentos denominados inversores (TOLMASQUIM, 2016)

Normalmente estes inversores são classificados de acordo com o seu porte, em microinversores, *string* e inversores centrais (TOLMASQUIM, 2016). Os microinversores são inversores individuais, desenvolvidos para funcionar com apenas um painel fotovoltaico, podendo ser ligados em outros microinversores a fim de ampliar a potência da instalação. Inversores do tipo *string* são equipamentos monofásicos ou trifásicos, utilizados em instalações residenciais e comerciais, podendo receber a ligação de um número limitado de painéis. Esse tipo de inversor pode ser visualizado na Figura 21.

Figura 21 - Inversor do tipo *string*



Fonte: Do Autor (2017).

Já as centrais, são inversores de grande capacidade, com potências variando da casa de kW à MW, podendo receber vários arranjos de painéis, sendo utilizadas em usinas fotovoltaicas (TOLMASQUIM, 2016). Um exemplo de inversor central pode ser visto na Figura 22. Independente da ordem de grandeza, todos esses modelos de inversores dispõem de dispositivos de proteção que garantem a segurança na geração de energia elétrica e na operação das redes de energia. Caso haja alguma falha, como falta de energia elétrica na rede ou surto de tensão ou frequência, esses equipamentos desconectam-se automaticamente da rede (MIRANDA, 2016).

Figura 22 - Inversor central de 500 kW de potência



Fonte: Do Autor (2017).

As USF são usinas que atingem potências que podem chegar na ordem de MWp, sendo operados por geradores independentes, conectados normalmente a redes de média e alta tensão, dependendo da potência instalada (PINHO; GAUDINO, 2014; MIRANDA, 2016). A potência mínima para habilitação e homologação de uma USF participar dos leilões de energia é de 5 MWp (PERAZA, 2013).

Atualmente, a maior USF em operação no Brasil localiza-se no município de Tubarão/SC, com 19.424 painéis, em uma área de 10 hectares, totalizando 3 MWp. A usina foi inaugurada em agosto de 2014 e até o final de 2016 gerou 9.190 GWh de energia (ENGIE, 2017).

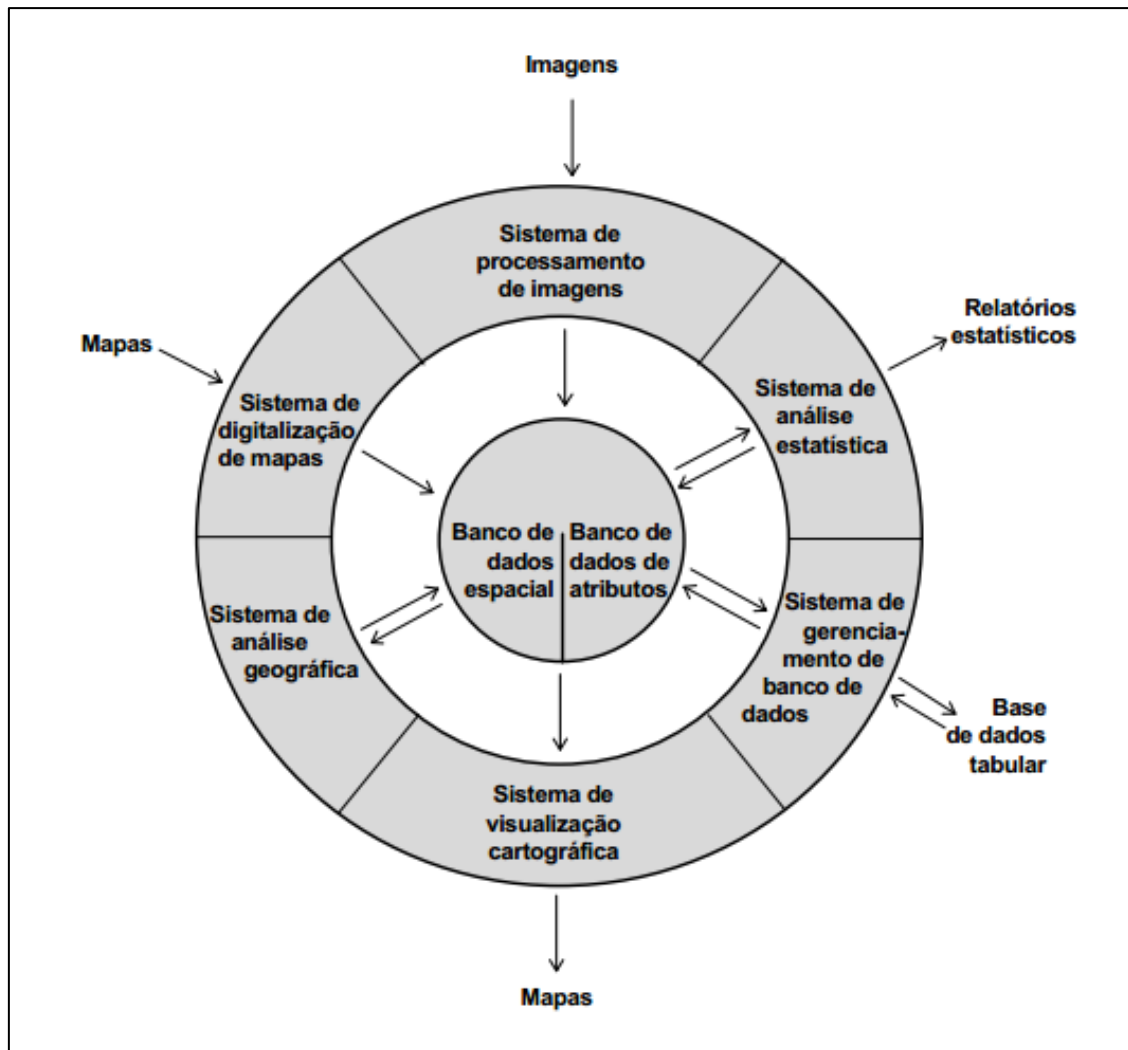
3.6 Sistemas de informações geográficas

Um Sistema de Informações Geográficas (SIG) é definido como “um sistema auxiliado por computador para aquisição, armazenamento, análise e visualização de dados geográficos” (Eastman, 1997, p. 4).

Atualmente, as diversas ferramentas computacionais de SIG permitem a organização, criação e manipulação de informações georreferenciadas, de acordo com a finalidade. Assim, essas ferramentas desempenham suas funcionalidades de maneira semelhante, partindo da inserção de dados para a análise e processamento, até a geração dos mapas ou dados tabulados (EASTMAN, 1997; VICARI, 2012).

A estrutura do SIG é composta, basicamente, por mecanismos de interface com o usuário, entrada e integração de dados, pesquisa e análise espacial, visualização, plotagem, armazenamento e recuperação de dados e informações, organizados sob forma de banco de dados, estruturados na forma da Figura 23 (EASTMAN, 1997; SCHMIDT, 2016).

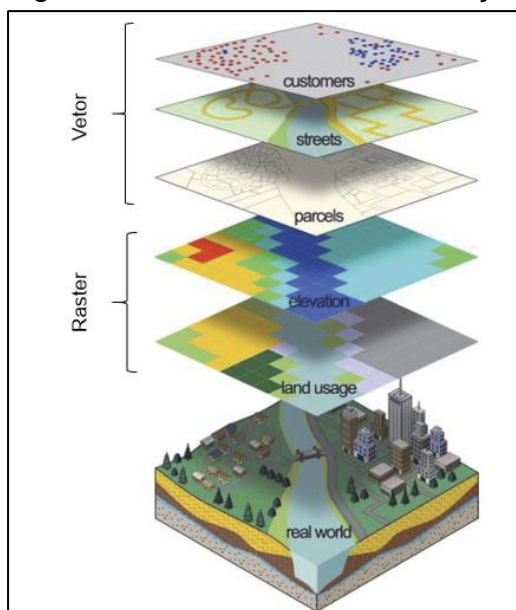
Figura 23 - Componentes de um SIG



Fonte: Eastman (1997).

Conforme Schmidt (2016), a representação das estruturas de dados espaciais se dá a partir da utilização de dados digitais. Essa representação digital de uma situação real pode ser representada no formato *raster* (ou matricial) ou *vector* (vetorial). A estrutura matricial é dividida em quadros, formando células, formando pixels, que representam o espaço analisado. A estrutura vetorial é representada por elementos geométricos, como pontos, linhas ou áreas. Essas informações combinadas formam mapas que podem ser gráficos ou não gráficos, como representado na Figura 24.

Figura 24 - Estruturas de informação de um SIG



Fonte: Adaptado pelo Autor de Sánchez-Lozano (2013).

Para Carrión et al. (2008), o aumento da utilização de usinas solares fotovoltaicas depende da combinação de informações precisas acerca das características geomorfológicas, climatológicas e técnicas, garantindo, assim, a seleção dos melhores locais para a instalação dessas usinas.

De acordo com Uyan (2013), a escolha para a instalação de uma USF é uma tarefa complexa, sendo que a escolha dos melhores locais para a implantação depende de diversos fatores, como econômicos, ambientais e técnicos, sendo que, nem sempre os locais com os melhores índices de irradiância são os melhores locais para uma usina. Por vezes condições legais, como áreas de uso restrito ou de proteção ambiental obrigam optar por locais com menor irradiância.

A avaliação da aptidão dos locais para a implantação de uma usina solar se baseia na associação de diversos dados e origens, a fim de gerar um dado único. Dentre as melhores formas de se realizar esse arranjo é por meio da utilização de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) (VICARI, 2012). De acordo com Schmidt (2016), a organização dos dados em estruturas de SIG apresentam grande desempenho no gerenciamento dos dados espaciais, sendo que a utilização dessa técnica permite a obtenção, administração e representação de dados na forma de mapas.

Conforme Sánchez-Lozano (2013), o SIG pode ser definido como um sistema de hardware e software, concebido para a captura, armazenamento, análise, modelagem e apresentação de dados, referenciados espacialmente, para a resolução de problemas complexos de planejamento e gestão.

Jahangiri (2016) trata o SIG como sendo um sistema informático concebido para gerir e analisar informações espaciais e capaz de capturar, armazenar, analisar e apresentar informações geográficas espacializadas. Através da coleta e integração de informações de bancos de dados comuns, o SIG fornece as informações indispensáveis para a elaboração dos mapas. Essas informações são usadas para exibir eventos com mais clareza, prever eventos, resultados e preparar mapas.

Para Charabi e Gastli (2011), as ferramentas de SIG alcançaram um elevado nível de maturidade e emergiram como uma ferramenta poderosa para determinação dos melhores locais para a implementação de usinas de energia solar, proporcionando uma matriz elétrica mais flexível, eficiente e inteligente. O uso de SIG é capaz de processar, processar, analisar uma grande quantidade de dados espaciais e apoiar a tomada de decisões para a implantação espacial das usinas solares.

A avaliação do potencial de energia é o primeiro passo para a determinação dos locais com maior aptidão para a implantação de uma usina fotovoltaica. Além disso, a avaliação de outros fatores de extrema relevância para apoiar a tomada de decisão, dentre eles, uma combinação de condições não facilmente mensuráveis, se fazem necessárias, como a irradiação solar, temperatura e características geográficas dos locais estudados (FERRAZ, 2008).

As ferramentas de auxílio à tomada de decisão contribuem na difícil tarefa de se realizar escolhas, abordagens, definição de valores e pesos para os diferentes aspectos de uma atividade, tornando cada critério utilizado numa função matemática, que mede o desempenho das ações com relação a um determinado aspecto (FERRAZ, 2008; SCHMIDT, 2016).

Para Vicari (2012), a análise por múltiplos critérios é uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão que envolve a utilização de dados espaciais com um conjunto de definições definidas pelo tomador de decisão, gerando frequentemente um mapa.

Esse tipo de análise é comumente desenvolvida em conjunto com sistemas de SIG para a avaliação de instalação de USFs no mundo, classificando as áreas em aptas ou não aptas, agregando diferentes critérios sem necessariamente estarem relacionados entre si.

Diferentes métodos são utilizados para avaliação dos múltiplos critérios, como a Lógica Booleana, Lógica *Fuzzy*, e método AHP (*Analytical Hierarch Process*) (CHARABI e GASTLI, 2011; VICARI, 2012; SÁNCHEZ-LOZANO et al., 2013; JAHANGIRI et al., 2016).

O método da Lógica Booleana é um modelo simples de combinação de camadas em ambientes SIG. Os critérios booleanos baseados em 0 ou 1, onde os operadores matemáticos são AND (E) e OR (OU). Os mapas que resultam em valores 1 indicam que as áreas satisfazem certas condições previamente estabelecidas, já os resultados 0 indicam que as áreas não satisfazem tais condições (VICARI, 2012; JAHANGIRI et al., 2016; SCHMIDT, 2016). O resultado da combinação de camadas neste método baseado na lei booleana traz na saída do modelo um mapa dividido em duas classes, totalmente adequadas (1) ou totalmente inadequadas (0) (JAHANGIRI et al., 2016).

A lógica *Fuzzy* é um método de validação de similaridade matemática complexa e fidedigna, capaz de realizar a combinação de critérios contínuos, normalizados em um intervalo estabelecido, por exemplo, de 0 a 1 (OLIVEIRA, 2015; SCHMIDT, 2016). Para Vanacôr (2006), uma das vantagens da lógica *fuzzy* é que ela substitui as rigorosas definições de classes obtidas com a lógica booleana, como o “sim” e “não” por uma faixa de valores, entre os quais, podem ser determinados graus de pertinências de cada classe.

Vicari (2012) utilizou a lógica *Fuzzy*, descrita por Eastman (2003) e Malczewski (2004), como a combinação de dados espaciais, baseados em conceito de média ponderada, considerando a importância relativa de cada atributo dado, resultando em um mapa contínuo. De acordo com Vicari (2012), apesar de ser um método mais flexível que a lógica booleana, o método falha ao trabalhar com critérios restritivos, por considerar a ponderação de todos os fatores na forma de uma soma ponderada. Essa metodologia também foi aplicada por Charabi e Gastli (2011) para avaliar uso e

ocupação de solo em Omã, a fim de avaliar a exploração comercial de usinas solares fotovoltaicas naquele país.

De acordo com Saaty (1990), o método AHP representa um problema complexo por meio da estruturação hierárquica, priorizando fatores na análise de diversas alternativas. A estruturação se dá em quatro etapas: estruturação hierárquica, comparação paritária dos elementos em cada nível, princípio de priorização e sintetização de prioridades.

A estrutura hierárquica é onde se define o objetivo geral e se decompõe o sistema em vários níveis hierárquicos. A comparação por pares é realizada por pessoas com larga experiência ou informações consensuais acerca das questões a serem julgadas. O princípio da priorização determina o grau de importância dos elementos de cada nível hierárquico. A sintetização de prioridades tem por objetivo definir a prioridade global dos planos alternativos, através da multiplicação dos elementos da matriz de prioridades pelas prioridades relativas dos critérios (SAATY, 1990).

A escala entre de importância relativa entre alternativas proposta por Saaty (1990), atribuindo valores de 1 a 9, onde 1 significa indiferença e 9 significa extrema importância é uma das mais utilizadas e é apresentada na tabela 2.

Tabela 2 - Escala de importância

Escala	Avaliação	Recíproco	Comentário
Igual importância	1	1	Os dois critérios contribuem igualmente para os objetivos
Importância moderada	3	1/3	A experiência e o julgamento favorecem um critério levemente sobre o outro
Mais importante	5	1/5	A experiência e o julgamento favorecem um critério fortemente sobre o outro

Escala	Avaliação	Recíproco	Comentário
Muito importante	7	1/7	Um critério é fortemente favorecido em relação a outro e pode ser demonstrado na prática
Importância extrema	9	1/9	Um critério é favorecido em relação ao outro com o mais alto grau de certeza
Valores intermediários	2, 4, 6 e 8		Quando se procura condições de compromisso entre duas definições. É necessário acordo

Fonte: Adaptado pelo Autor de Saaty (1990).

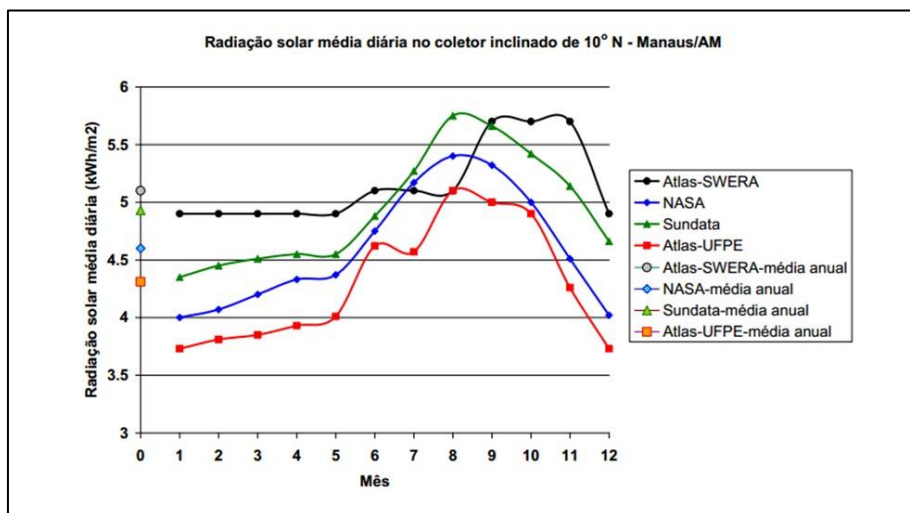
Na área ambiental, a utilização de SIG com o método AHP como ferramenta de apoio a tomada de decisão é frequentemente observada para avaliação de aptidão de áreas para implantação de aterros sanitários (BORN, 2014; SCHMIDT, 2016), para mapear áreas para instituição de unidades de conservação ambiental (BIANCHINI, 2016), zoneamento de áreas de inundação e movimentos de massa (VANACÔR, 2006; BRITO, 2014; SANTOS, 2015), índices de desempenho ambiental na mineração (SILVA, 2014), além dos melhores locais para implantação de usinas solares fotovoltaicas (CARRIÓN et al., 2008; UYAN, 2013).

3.7 Informações meteorológicas

A coleta sistemática de dados meteorológicos é de fundamental importância para dar suporte aos estudos necessários para a implementação de uma USF. A avaliação do potencial de geração de energia de fonte solar se dá, principalmente, pela irradiação solar, temperatura e velocidade do vento. Existem ainda correlações que podem ser feitas, como o número de horas de sol e a nebulosidade (PINHO e GALDINO, 2014).

Diversas fontes de dados são utilizadas para se verificar o potencial de irradiação solar em um determinado local, como informações de satélites, ferramentas computacionais e medições de superfície, podendo apresentar discrepâncias entre os métodos utilizados (PINHO e GALDINO, 2014). Tais diferenças verificam-se na Figura 25.

Figura 25 - Diferenças nos resultados de irradiação utilizando diferentes metodologias



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

O programa RADIASOL 2, desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), sintetiza diversos dados meteorológicos em uma base de dados e permite a automação dos cálculos relativos às informações de radiação solar global, dividindo em radiação direta e difusa e ainda calcula a irradiação horária sobre o plano inclinado (PERAZA, 2013; AKWA et al., 2013; PINHO e GALDINO, 2014).

Além de premissa básica para a implantação da usina solar, a avaliação meteorológica é de fundamental importância após o início da operação do empreendimento, a fim de reduzir as incertezas quanto a geração de energia. Essa medida visa garantir a segurança e o suprimento de energia elétrica no SIN (TOLMASQUIM, 2016).

A fim de se avaliar as condições meteorológicas, comumente são utilizados dados de estações meteorológicas automáticas. Essas estações possuem sensores

que operam com de forma eletrônica e armazenam os dados em um sistema de *data logger*, possibilitando o armazenamento e processamento dos dados (VIEIRA; PICULLI, 2012). Os sensores mais comuns utilizados nessas estações são termômetro (mede a temperatura do ar), higrômetro (mede a umidade relativa do ar), piranômetro (mede a radiação solar global), barômetro (mede a pressão atmosférica), pluviômetro (mede a precipitação), cata-vento (indica a direção dos ventos) e o anemômetro (mede a velocidade do vento).

Para a implantação de uma USF são necessários dados de radiação solar provenientes de uma estação solarimétrica, equipada com pelo menos dois piranômetros de padrão “*first class*” ou superior, de acordo com a norma ISO 9060:1990, para medição de irradiância global horizontal, além de sensores para umidade relativa, temperatura e velocidade do vento (EPE, 2016).

4 METODOLOGIA

4.1 Caracterização da área de estudo

4.1.1 Localização da área de estudo

O estado do Rio Grande do Sul localiza-se no extremo meridional do Brasil (figura 26), com uma população estimada em 2016 de 11.286.500 habitantes, o equivalente a 6% da população brasileira, com uma área total de 281.738 km² e 497 municípios (IBGE, 2010).

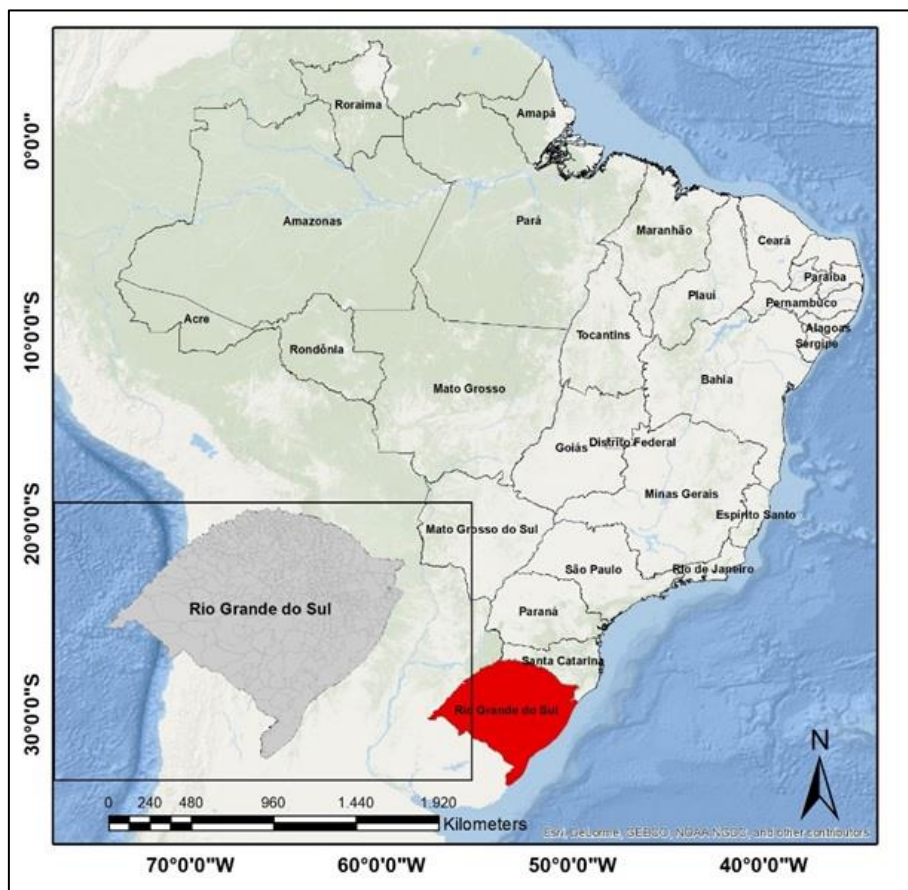
O Estado se localiza entre os paralelos 33°45'37" S e 27°05'20" S e os meridianos 57°36'14" O e 49°42'00" O, tendo como limites com o estado de Santa Catarina, com o Oceano Atlântico e com as Repúblicas da Argentina e Uruguai, como pode ser visualizado na Figura 26 (IBGE, 2010).

A distribuição da população do Estado não é uniforme, concentrando-se principalmente no eixo Porto Alegre - Caxias do Sul, onde, dos 29 municípios Gaúchos com mais de 200 habitantes por km², 19 fazem parte dessa região. A maior parcela dos municípios (66,7%) possui até 10 mil habitantes. De acordo com a Fundação de Economia e Estatística do Rio Grande do Sul, os municípios com mais de 100 mil habitantes são apenas 18, concentrando 46,8% da população.

Além disso, segundo o IBGE (2010), a participação econômica do Estado representa 7% do Produto Interno Bruto (PIB) do país, colocando o Estado em 4º lugar

entre os estados da Federação. O PIB per capita é de aproximadamente R\$ 27.000,00 por ano.

Figura 26 - Localização do estado do Rio Grande do Sul



Fonte: Do Autor, 2017.

De acordo com a classificação geomorfológica descrita por Simielli (2009), o Estado é dividido em quatro regiões, denominadas Planalto Norte-Riograndense, Depressão Central, Planalto Sul-Rio-Grandense e Planície Litorânea.

O Planalto Norte-Riograndense ou Planalto Meridional é formado por rochas basálticas decorrentes dos derrames de lavas ocorrido na era Mesozóica. Na área do extremo oeste, a erosão formou a chamada Cuesta do Haedo. Caracteriza-se também por ter uma superfície ondulada, onde se encontram as maiores altitudes do Estado, podendo atingir até 1.300 m de decrescem, na porção central do Planalto a altitudes de até 700 m. Devido as antigas fraturas e à intensa erosão no basalto, na sua porção

leste ocorrem escarpas abruptas e elevados declives. A Encosta do Planalto é denominada Serra Geral (BECKER; NUNES, 2012).

A região central do Estado é caracterizada pela Depressão Central onde predomina a cobertura florestal ao norte do rio Jacuí e as pastagens e áreas agricultáveis ao sul. A Depressão Central se assemelha a uma planície que se estende de leste a oeste. Essa região é caracterizada por baixas variações altimétricas, oscilando entre 100 e 200 m e separa o Planalto Norte Rio-Grandense do Planalto Sul-Rio-Grandense (BECKER; NUNES, 2012).

O Planalto Sul-Rio-Grandense ou Escudo Sul-Rio-Grandense localiza-se no centro-sul do Estado e é formado pelas rochas mais antigas, do período Pré-Cambriano, com relevo de formas onduladas, não ultrapassando 500 m de altitude. Essa região é caracterizada pelo bioma Pampa, conhecido pelos campos neutrais e grandes pastagens, ocupadas principalmente para o cultivo de arroz nas áreas alagadas e pecuária (BECKER; NUNES, 2012; RIO GRANDE DO SUL, 2014).

A Planície Litorânea ou Planície Costeira localiza-se na porção leste do Estado, abrangendo a totalidade do litoral, estendendo-se desde o município de Chuí (RS) até Torres (RS), com mais de 622 km de extensão, praticamente retilínea. Notada pela presença de lagos e lagoas, essa região é coberta por vegetação de baixa rugosidade, com presença de dunas, reflorestamentos, áreas agrícolas, com pastagem e plantações, e gramíneas (BECKER; NUNES, 2012; RIO GRANDE DO SUL, 2014).

4.1.2 Hidrografia

O Rio Grande do Sul é banhado por três grandes regiões hidrográficas, dentre elas a bacia hidrográfica do Uruguai, bacia hidrográfica do Guaíba e a Litorânea. A bacia do Uruguai abrange aproximadamente 57% da área total do Estado. A bacia do Guaíba abrange 30% da área do Estado e a Bacia Litorânea abrange 13% do total (PACHECO, 2001; RIO GRANDE DO SUL, 2014). Ressalta-se também a

característica distinta de dois grupos de cursos d'água, os que correm para o Oceano Atlântico e os que correm no sentido do Rio Uruguai (PACHECO, 2001).

A Bacia Litorânea possui uma superfície de aproximadamente 63.000 km², percorrendo o Planalto Meridional e a Planície Costeira e possui seis sub-bacias, desde o Nordeste do Rio Grande do Sul até o extremo Sul do Estado, dentre elas a Bacia do Rio Mampituba, Bacia do Rio Tramandaí, Bacia do Litoral Médio, Bacia do Camaquã, Bacia do Jaguarão e Bacia do Piratini-São Gonçalo-Mangueira (PACHECO, 2001).

A Bacia do Rio Guaíba localiza-se em uma área de 84.763 km² (FEPAM, 2017). Essa bacia abrange uma área correspondente a 30% do Estado, localizando-se na porção nordeste. Nessa bacia hidrográfica existem 251 municípios e neles vivem 5.869.265 habitantes, abrangendo a região metropolitana de Porto Alegre (FEPAM, 2017). É formada por oito sub-bacias, dentre elas A Bacia do Alto Jacuí, Bacia do Pardo, Bacia do Vacacaí, Bacia do Baixo Jacuí, Bacia Taquari-Antas, Bacia do Caí, Bacia do Sinos e Bacia do Gravataí (PACHECO, 2001; FEPAM, 2017). Na Bacia do Guaíba existem seis usinas hidrelétricas, dentre elas a de Ernestina, Passo Real, Salto do Jacuí, Itaúba e Dona Francisca, o que demonstra o potencial energético dos recursos hídricos disponíveis (PACHECO, 2001).

A Bacia do Uruguai possui uma extensão de 127.031 km², representando 47,88% da área do Estado. A população que vive nessa área é de aproximadamente 2.416.400 habitantes (FEPAM, 2017). A Bacia do Uruguai é fragmentada em outras dez unidades hidrográficas, sendo elas Bacia do Apuaê-Inhandava, Bacia do Passo Fundo, Bacia do Turvo-Rosa-Santo Cristo, Bacia do Butuí-Piratini-Icamaquã, Bacia do Ibicuí, bacia do Quaraí, Bacia do Santa Maria, Bacia do Negro, Bacia do Ijuí e Bacia do Várzea (FEPAM, 2017). Sua rede hidrográfica estende-se desde as Missões, Alto-Uruguai, Campos de Cima da Serra, Campanha até a Depressão Central. Sua importância está ligada a posição geográfica, por ser transfronteiriça com a Argentina e Uruguai, além do estado de Santa Catarina (PACHECO, 2001). A Bacia do Uruguai possui grande importância na matriz elétrica do Sul do Brasil, como o caso das UHE de Ité, com 1.450 MW de capacidade instalada, UHE Machadinho, com 1.140 MW, UHE Campos Novos, com 880 MW e UHE Barra Grande, com 690 MW (ESPÍNDOLA, 2009).

4.1.3 Clima

As avaliações climáticas são fundamentais para a elaboração dos estudos de aproveitamento de fontes de energias de origens renováveis. Por se tratar de uma fonte altamente dependente dos fatores climáticos, a energia solar depende basicamente da radiação solar para se tornar viável. Porém, outros fatores climáticos podem influenciar na geração de energia solar fotovoltaica, como o sombreamento causado pela poluição atmosférica (SPALENZA, 2013). Para Spalenza et al. (2013), a chuva pode auxiliar na redução dos depósitos de sujeira sobre os painéis. Segundo a autora, em regiões onde os índices pluviométricos são altos, a chuva é, muitas vezes, suficiente para fazer esta limpeza. Já em regiões com baixos índices pluviométricos essa limpeza deve ser realizada de maneira manual ou mecanizada.

Com relação ao clima do Estado, as chuvas ocorrem de forma bem distribuídas ao longo do ano, onde as regiões menos chuvosas são o litoral sul e o extremo sul, onde a precipitação varia entre 60 e 80 mm por mês. Já as temperaturas médias, os menores valores ocorrem em julho, entre o leste da região do Planalto, com temperaturas entre 9° e 10°C, e os valores máximos são observados no mês de janeiro, principalmente nas regiões do baixo e do alto Rio Uruguai, onde as temperaturas atingem a média de 26°C (KUINCHTNER e BURIOL, 2016).

De acordo com Kuinchtner e Buriol (2016), estes valores enquadram o Estado no tipo climático Cf, temperado e chuvoso da classificação de Köppen. Nos meses mais quentes, considerando todas as regiões, as temperaturas médias variam entre 18° e 26°C, podendo ser enquadrado nas variedades climáticas a e b.

Segundo com Rossato (2011), o Estado se localiza em latitudes medianas, onde os tipos climáticos atuantes são controlados por sistemas polares e tropicais.

O estudo da variabilidade climática do Estado, com dados obtidos entre 1970 e 2007, realizado por Rossato (2011) propôs a divisão climática do RS como:

- Subtropical I - Pouco úmido: Subtropical Ia - Pouco úmido com inverno frio e verão fresco, e Subtropical Ib - Pouco úmido com inverno frio e verão quente;

- Subtropical II: Medianamente úmido, com variação longitudinal das temperaturas médias;
- Subtropical III: Úmido com variação longitudinal das temperaturas médias;
- Subtropical IV - Muito úmido: Subtropical IVa - Muito úmido com inverno fresco e verão quente, e Subtropical IVb - Muito úmido com inverno frio e verão fresco.

As regiões do Estado enquadradas por Rossato (2011) como Subtropical Ia são as que recebem as menores quantidades de chuva durante o ano, entre 1200 e 1500 mm, distribuídas entre 80 e 100 dias. Também, nessa região a amplitude térmica é menor, mas variam entre -7°C no dia mais frio do inverno e chega a 41°C no verão, e as temperaturas médias anuais variam entre 17° e 20°C.

O clima Subtropical Ib abrange a região da Cuesta do Haedo chove mais que na região Subtropical Ia, porém são mais mal distribuídas, visto que chovem entre 70 e 90 dias, totalizando entre 1400 e 1700 mm por ano. Por conta da continentalidade, a amplitude térmica é maior durante o ano, onde pode fazer -7°C no dia mais frio do inverno e 41°C no dia mais quente do verão, e as temperaturas médias anuais variam entre 20° e 23°C.

A área da Depressão Central, cortando o Estado de oeste a leste até o Litoral Médio é onde ocorre o clima Subtropical II. Nessas regiões as chuvas são distribuídas entre 90 e 110 dias, variando entre 1500 e 1700 mm por ano. As temperaturas médias anuais variam entre 17° e 20°C, onde as mínimas não baixam de -4°C no dia mais frio do inverno e a temperatura mais alta atinge 41°C no verão.

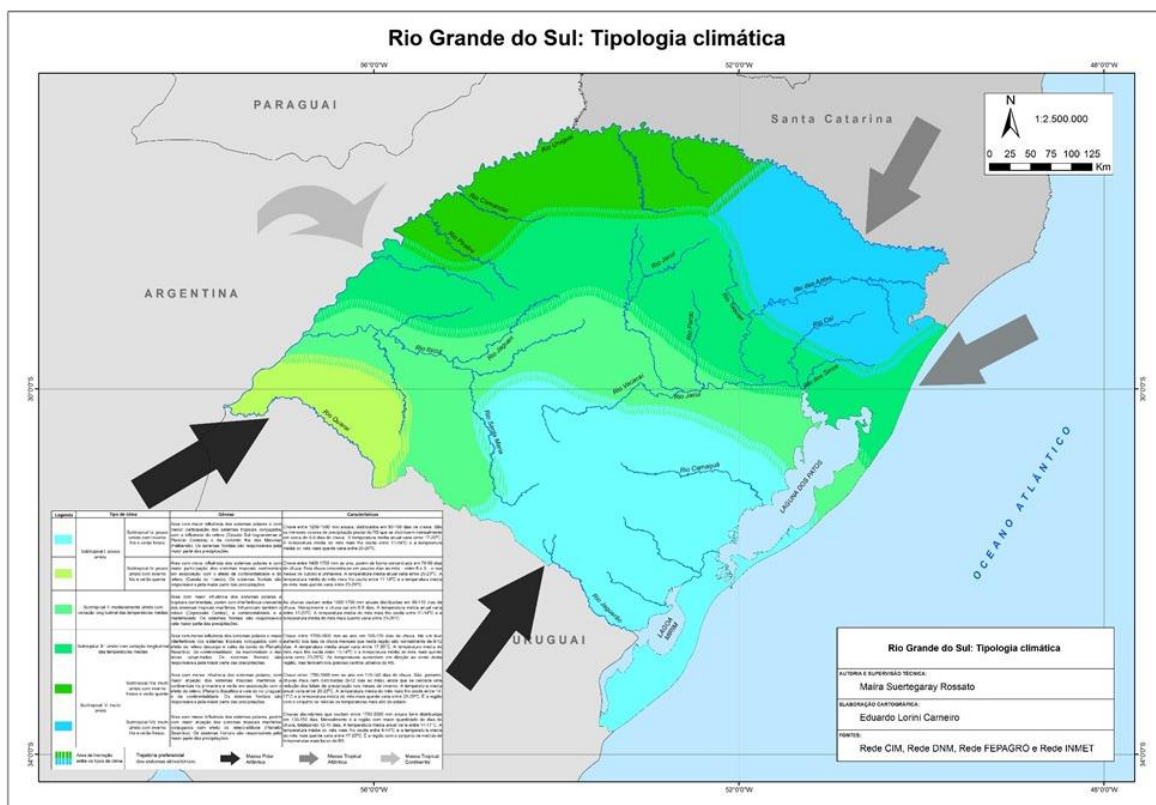
O clima Subtropical III é localizado na área do Planalto Basáltico até o litoral Norte, recebendo menor influência dos sistemas polares no Estado. Nessa região é observado um aumento nos totais pluviométricos nos últimos anos e no número de dias chuvosos, principalmente por conta de chuvas orográficas. Nesta região chove entre 1700 e 1800 mm por ano, espalhados entre 100 e 120 dias. As temperaturas médias anuais variam entre 17° e 20°C, mas na porção oeste essa média varia entre 20° e 23°C. Nestas áreas as temperaturas mínimas observadas chegam a -4°C, atingindo 41°C nos dias mais quentes do verão. As áreas urbanizadas, como a região Metropolitana e os grandes centros urbanos contribuem de maneira significativa no aumento da temperatura pela maior emissão de calor das superfícies que absorvem maior quantidade de radiação solar.

A região entre o norte e o noroeste do Planalto Basáltico, junto ao vale do rio Uruguai é onde ocorre o clima Subtropical IVa. Grandes volumes de chuvas ocorrem nessa região, variando entre 1700 e 1900 mm anuais, distribuídos entre 110 e 140 dias. Nesta região observam-se as temperaturas mais altas do Estado, mesmo que as médias variam entre 20° e 23°C anuais. A temperatura mais baixa é de -4°C nos dias mais frios do inverno, enquanto podem ocorrer temperaturas de até 44°C no verão.

O clima Subtropical IVb ocorre no leste do Planalto Basáltico. Nesta área as chuvas variam entre 1700 e 2000 mm, espalhados entre 130 e 150 dias por ano. As temperaturas médias anuais variam entre 14° e 17°C. Nos dias mais frios ocorrem temperaturas de até -4°C e nos dias mais quentes a temperatura não passa dos 38°C.

A síntese das classificações climáticas do Rio Grande do Sul proposta por Rossato (2011) pode ser vista na Figura 27.

Figura 27 - Síntese da classificação climática do Rio Grande do Sul



Fonte: Rossato (2011).

4.1.4 Infraestrutura de transportes

O modal de transportes preponderante no Rio Grande do Sul é o rodoviário, por onde escoam 85,3% das cargas do estado, 8,8% por ferrovias e apenas 3,7% por hidrovias (RIO GRANDE DO SUL, 2014). De acordo com o Departamento Autônomo de Estradas e Rodagem - DAER-RS, até março de 2017 o Estado possuía 19.040 km de estradas e rodovias, sendo 13.545 km pavimentadas e 3.799 não pavimentadas. Além de rodovias, o Estado conta com mais de 3.000 km de ferrovias e uma rede de transporte hidroviário e 8 aeroportos, sendo um internacional e 7 regionais (DAER, 2017).

4.1.5 Geração de energia elétrica

De acordo com a ANEEL (2017), a capacidade instalada de geração de energia elétrica no Rio Grande do Sul é de 9.527,76 MW, onde 57,2% proveniente de fonte hidráulica, por meio de UHEs, PCHs e CGHs, 18% Eólica e 24,7% Térmicas movidas principalmente por combustíveis de origem fóssil. Com relação a usinas solares fotovoltaicas, o Estado conta com duas unidades, com uma potência total instalada de 0,046 MWp. A ANEEL não considera sistemas de Geração Distribuída como fazendo parte da matriz elétrica. Neste caso, o Estado conta com 1.098 unidades consumidoras com sistema solar fotovoltaico instalado, perfazendo um total de 10,08 MWp, sendo o 4º Estado com maior capacidade instalada destes sistemas.

Há uma tendência para um aumento na diversificação da matriz elétrica do Estado por meio de fontes renováveis de energia, como a ampliação da exploração do potencial eólico, projetos de aproveitamento solar e ampliação da utilização de biocombustíveis, melhorando a disponibilidade, garantindo a segurança energética e uma maior sustentabilidade ambiental (RIO GRANDE DO SUL, 2014).

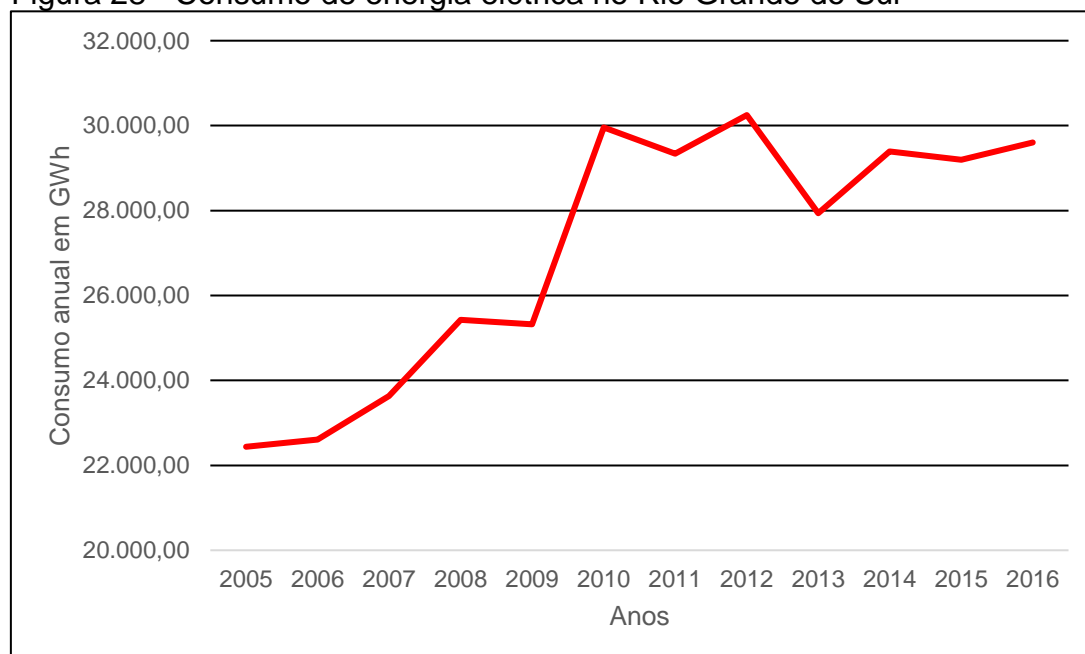
A distribuição da energia elétrica é executada por 23 agentes, dentre eles 8 concessionárias do serviço público e 15 cooperativas de eletrificação rural. Mais de 90% da energia elétrica é distribuída por apenas 2 concessionárias, dentre elas a Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE) e a Rio Grande Energia (RGE),

totalizando mais de 4 milhões de unidades consumidoras (RIO GRANDE DO SUL 2014).

O Estado possui 64 subestações de energia elétrica nas tensões de 230 kV, 138 kV e 69 kV, sendo 44 destas pertencentes à Rede Básica. A capacidade de transformação dessas subestações é de 8.043,96 MVA. Além disso, o Estado possui mais de 6.170 km de linhas de transmissão (PERAZA, 2013).

O crescimento econômico reflete no aumento do consumo da energia elétrica (CAPELETTO; MOURA; ZANCHI, 2015). O consumo de energia elétrica no Estado apresenta incremento constante desde 2005 até 2012, decaindo em 2013 aos patamares semelhantes ao de 2007, retomando uma tendência de crescimento em 2014, como pode ser observado na Figura 28.

Figura 28 - Consumo de energia elétrica no Rio Grande do Sul



Fonte: Adaptado pelo autor de Capeletto, Moura e Zanchi (2015).

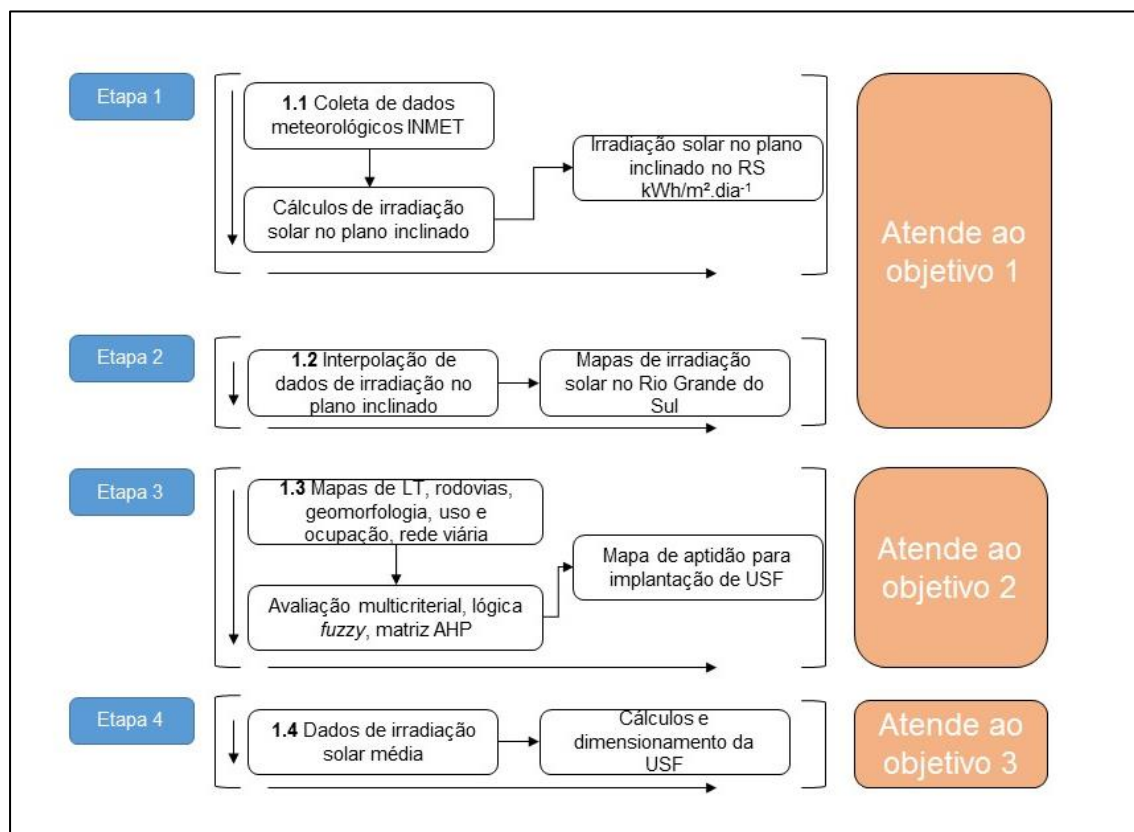
Dentre os maiores consumidores, destaca-se o setor industrial, responsável por 38,6% da energia elétrica do Estado. O setor residencial é responsável por 24,4%, seguido pelos setores comercial (15,7%) e agropecuário (12,9%), e o restante, 8,4%, é consumido pelos setores público e transporte (CAPELETTO; MOURA; ZANCHI, 2015).

4.2 Métodos

O presente trabalho foi estruturado em quatro etapas principais:

- **Etapa 1:** Coleta de dados meteorológicos, ajustes de unidades e conversão de dados de irradiação no plano horizontal para o plano inclinado para cada estação meteorológica.
- **Etapa 2:** Elaboração de mapas de irradiação solar mensais e média anual, empregando ferramenta de interpolação de dados.
- **Etapa 3:** Implementação de análise multicriterial para a definição das áreas mais aptas para a instalação de uma usina solar.
- **Etapa 4:** Dimensionamento de USF em área apta, utilizando os dados de irradiação solar, características de aptidão de áreas e características técnicas de equipamentos selecionados por um software específico.

Figura 29 - Fluxograma das etapas do trabalho

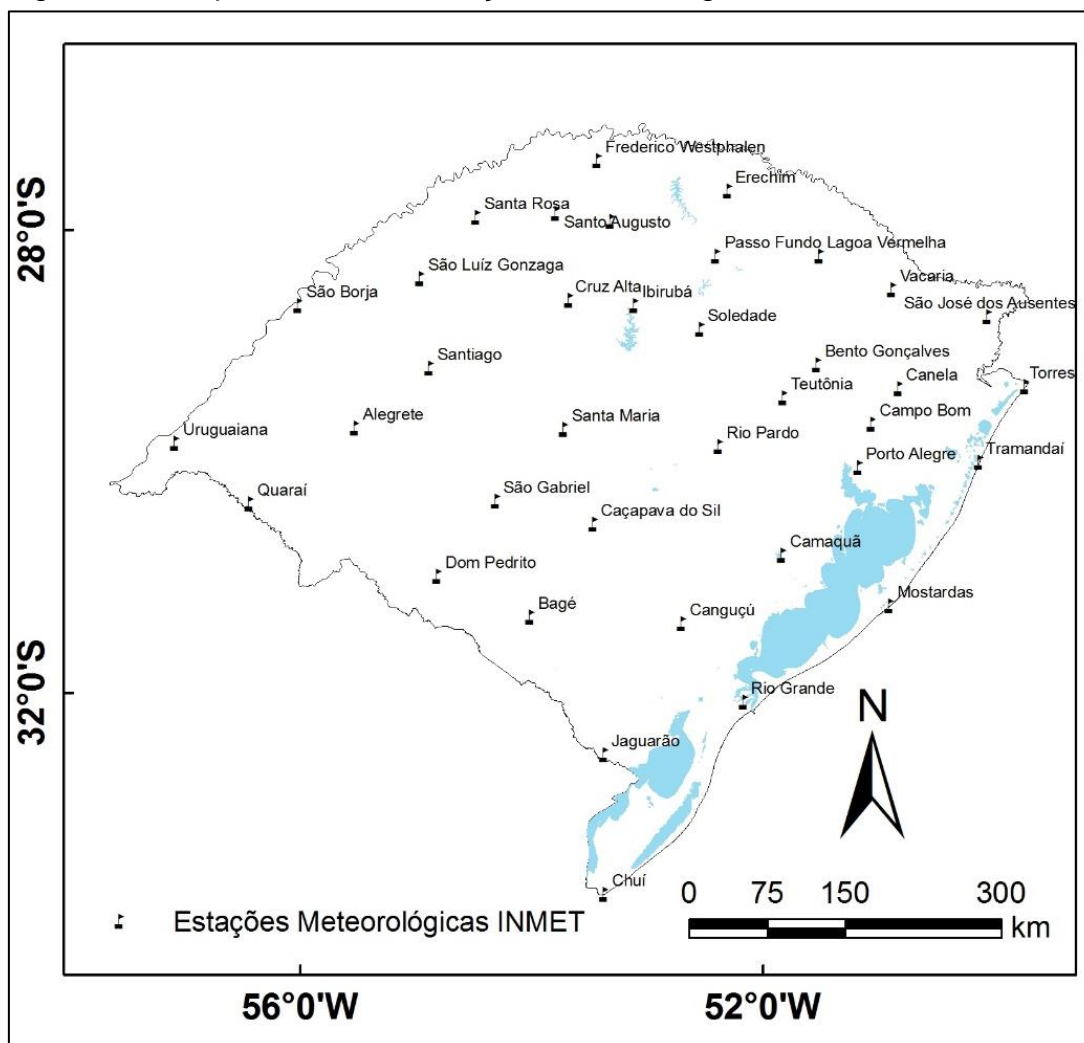


Fonte: Do Autor, 2017.

4.2.1 Identificação de áreas mais aptas

A fim de se avaliar o potencial de geração de energia solar fotovoltaica no Rio Grande do Sul foram utilizados os dados climáticos disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), das estações meteorológicas automáticas espalhadas por todas as regiões do Estado (figura 30). As estações meteorológicas do INMET são da marca VAISALA, modelo MAWS301, dotadas de termômetro, higrômetro, piranômetro, barômetro, pluviômetro, cata-vento, anemômetro e registrador de dados, além de um painel solar fotovoltaico para a alimentação elétrica dos componentes. Os dados, registrados de hora em hora, de temperatura, irradiância solar e velocidade dos ventos foram utilizados para a realização das avaliações.

Figura 30 - Mapa da rede de estações meteorológicas do INMET



Fonte: Do Autor, 2017.

A radiação solar global é coletada pelo piranômetro, marca Kipp & Zonen, modelo CM 6B, instalado na Estação. Os dados de temperatura são medidos pelo termômetro marca Vaisala, modelo QMT102 e os dados de velocidade do vento através do anemômetro marca Vaisala, modelo WAA15.

Foram solicitadas ao INMET os dados de 37 estações meteorológicas automáticas do Estado, desde a data de sua instalação até o dia 31 de dezembro de 2016. A Tabela 3 apresenta a relação das datas de instalação, nome e localização dos equipamentos, sendo a mais recente com dados com mais de 3 anos e a mais antiga, com dados de mais de 16.

Tabela 3 - Relação das estações meteorológicas com dados avaliados.

Data de início	Estação	Longitude (°)	Latitude (°)
22/09/2000	Porto Alegre	-51,1748	-30,0535
22/11/2001	Rio Grande	-52,1677	-32,0788
27/11/2001	Santa Maria	-53,7205	-29,7250
06/12/2001	Santo Augusto	-53,7912	-27,8543
02/06/2006	Torres	-49,7333	-29,3504
22/06/2006	Caçapava do Sul	-53,4671	-30,5453
28/09/2006	Uruguaiana	-57,0819	-29,8399
01/10/2006	Rio Pardo	-52,3820	-29,8721
03/10/2006	Alegrete	-55,5255	-29,7091
27/10/2006	São José dos Ausentes	-50,0579	-28,7486
16/11/2006	Santa Rosa	-54,4800	-27,8905
27/11/2006	Passo Fundo	-52,4036	-28,2268
28/11/2006	Erechim	-52,3058	-27,6577
02/12/2006	Bento Gonçalves	-51,5342	-29,1646
14/12/2006	Camaquã	-51,8342	-30,8080
05/01/2007	Bagé	-54,0133	-31,3478
10/01/2007	Jaguarão	-53,3759	-32,5348
25/01/2007	Canguçu	-52,7007	-31,4033
02/03/2007	Lagoa Vermelha	-51,5128	-28,2224
01/06/2007	Cruz Alta	-53,6736	-28,6034
22/07/2007	São Borja	-56,0163	-28,6501
26/07/2007	São Luiz Gonzaga	-54,9624	-28,4171
12/10/2007	São Gabriel	-54,3109	-30,3414
17/10/2007	Quaraí	-56,4371	-30,3686
14/12/2007	Frederico Westphalen	-53,4294	-27,3957
01/03/2008	Soledade	-52,5424	-28,8592
04/03/2008	Palmeira das Missões	-53,3180	-27,9204
10/03/2008	Tramandaí	-50,1359	-30,0103

Data de início	Estação	Longitude (°)	Latitude (°)
13/03/2008	Mostardas	-50,9063	-31,2483
17/03/2008	Chuí	-53,3722	-33,7423
27/04/2008	Vacaria	-50,8827	-28,5136
27/08/2008	Canela	-50,8272	-29,3688
18/03/2009	Santiago	-54,8857	-29,1916
28/04/2010	Dom Pedrito	-54,8153	-30,9925
09/10/2012	Teutônia	-51,8243	-29,4503
14/12/2012	Ibirubá	-53,1119	-28,6535
03/12/2013	Campo Bom	-51,0640	-29,6743

Fonte: Do Autor, 2017.

As informações coletadas foram tratadas para verificação de inconsistências e interrupções, bem como ajustadas e convertidas as unidades de medidas necessárias para as avaliações. O início da operação das estações nem sempre coincidiu com o primeiro dia do mês. Os dados dos meses incompletos foram descartados, da mesma forma que nos casos em que foram encontradas falhas nos períodos. Nesta etapa utilizou-se o software Microsoft Excel®, versão 2016 para as verificações e tratamentos necessários, gerando-se dados de irradiância média diária mensal no plano horizontal.

A irradiância solar no plano inclinado (kWh/m².dia⁻¹) foi calculada a partir da radiação solar global medida em cada estação meteorológica, bem como dados de temperatura e umidade relativa, por meio do software RADIASOL 2 (KRENNINGER; BUGS, 2010) que utiliza os seguintes métodos para a obtenção destes valores:

A radiação solar global em um plano inclinado em kW/m² é obtida pela equação 5.

$$I_t = I_{DIR} \left(1 - \frac{H_d}{H}\right) R_b + I_{DIF} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + I_{GH} \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (5)$$

Em que:

I_{DIR} – Irradiância solar global horizontal (W/m²);

I_{DIF} – Irradiância solar difusa na superfície horizontal (W/m²);

I_{GH} – Irradiância global horizontal (W/m²)

R_b – Fator geométrico;

β – Inclinação do painel solar (graus);

ρ – Albedo

O fator geométrico R_b é dado pela equação 6.

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (6)$$

Em que:

θ – Ângulo de incidência (graus);

θ_z – Ângulo zenital solar (graus).

O ângulo de incidência θ e o ângulo zenital θ_z são obtidos pelas equações 7 e 8.

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \\ & \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (7)$$

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (8)$$

Em que:

γ – Desvio azimutal (graus);

ϕ – Latitude do local (graus);

δ – Declinação solar (graus);

ω – Ângulo horário solar (graus).

O ângulo horário do sol ω é a representação angular do meio dia solar, de acordo com a equação 9.

$$\omega = 15(h - 12) \quad (9)$$

Em que:

h - Hora do dia ($1 \leq h \leq 24$).

4.2.2. Interpolação de dados

Para a realização deste estudo, uma das maiores dificuldades está relacionada a obtenção de dados de irradiância solar nos locais onde não existem as estações meteorológicas. Como a variabilidade para o estudo na área de energia solar é fortemente dependente das condições de clima, topografia, vegetação, latitude, entre outras, as técnicas matemáticas de interpolação convertem valores pontuais em superfícies, preenchendo o restante do espaço onde não existem dados, com valores estimados (MARTINAZZO, 2004; CAMPOS, 2010).

Existem diversos algoritmos de interpolação de dados, dentre eles, os mais utilizados para a distribuição espacial de dados climatológicos, como é o caso da radiação solar, são:

- Inverso do quadrado da distância (*Interpolation Distance Weighted* - IDW). O IDW é um dos métodos mais eficientes para se interpolar valores de pontos dispersos. Neste método, quanto mais distante um ponto estiver do observador, menor será seu peso ou sua influência sobre o valor inferido, dados pela equação 10 (SILVA; FERREIRA; STOSIC, 2013).

$$Z_{(s0)} = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z_{(si)} \quad (10)$$

Em que:

$Z_{(s0)}$ – Valor estimado para o local;

N – Número de pontos observados;

λ – Pesos atribuídos a i-ésima localidade;

$Z_{(si)}$ – Valor observado.

Para a determinação do peso é utilizada a equação 11.

$$\lambda_i = \frac{d_{i0}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{i0}^{-p}} \quad (11)$$

Em que:

d_{i0} – Distância entre o local estimado s_0 e cada um dos locais observados s_i e $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$.

Observa-se que quanto maior for o valor do expoente p , menor é o valor para os pontos distantes e aumenta o valor dos pontos mais próximos. Esse método tende a formar contornos concêntricos ao redor dos pontos amostrados.

Esse método foi utilizado por WU et al., (2013) para avaliar a média diária de horas de sol e de irradiação solar incidente na China. Jahangiri et al., (2016) também utilizou o método IDW para espacializar os dados de velocidade dos ventos e irradiação solar, a fim de encontrar os melhores locais para implantação de uma usina híbrida, solar e eólica, no Oriente Médio. Pons e Ninyerola (2008) utilizaram o IDW para mapear os índices de irradiação solar em solo, implementando SIG.

- Krigagem. É um método geoestatístico para gerar a interpolação, que leva em consideração médias móveis de valores distribuídos no espaço, a partir dos valores próximos, considerados independentes pela função do variograma (MARTINAZZO, 2004; DE CARVALHO; ASSAD, 2005; CAMPOS, 2010).

De acordo com Mello (2003), o método de interpolação por Krigagem é desenvolvido de acordo com as equações 12 e 13:

$$A^{-1} \cdot b = \lambda \quad (12)$$

Em que:

A^{-1} – Matriz inversa de semivariância entre as localidades vizinhas do ponto;

b – Matriz de semivariância entre as localidades vizinhas e o ponto a ser interpolado;

λ – Matriz de pesos da Krigagem.

$$X_p = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot X_i \quad (13)$$

Em que:

X_p – Variável interpolada;

λ_i – Peso da i-ésima localidade vizinha;

X_i – Valor da variável para i-ésima localidade;

n – Número de localidades utilizadas na interpolação.

Este método considera as características espaciais de autocorrelação de variáveis regionalizadas. De acordo com Martinazzo (2004), estas variáveis devem conter certa continuidade espacial, permitindo que os dados obtidos possam ser utilizados para parametrização da estimativa dos valores onde o valor desta variável for desconhecido.

Martinazzo (2004), utilizou o método da Krigagem para a avaliação da estimativa de irradiação solar para a elaboração de mapas solarimétricos no Rio Grande do Sul. Caglayan; Ertekin; Evrendilek (2014), avaliaram a viabilidade de instalação de usinas solares fotovoltaicas na Turquia, utilizando como método de interpolação dos dados de irradiação solar a Krigagem.

- Curvatura mínima (*Spline*). É uma ferramenta flexível, que se diferencia das demais ferramentas de interpolação pois não utiliza polinômios de grande ordem para a interpolação do conjunto de dados, dividindo a série de dados em conjuntos distintos, e utiliza polinômios de pequena ordem para cada conjunto (CAMPOS, 2010). De acordo com Martinazzo (2004), os mapas gerados a partir deste método possuem contornos mais suavizados, porém, caso não existam valores amostrados dentro ou próximos da célula nó (Z), formas estranhas podem ser geradas. As equações 14 e 15 demonstram o desenvolvimento da interpolação:

$$\Delta^4 Z = 0 \text{ - com a existência da condição: } \Delta^2 Z = 0 \quad (14)$$

Em que:

Δ – Equação diferencial;

Z – Valor estimado para o nó da célula. A quarta derivada então é calculada pelo algoritmo:

$$\frac{\delta^4}{\delta_x} Z + \frac{\delta^4}{\delta_y} Z = 0 \quad (15)$$

Carvalho e Assad (2005), realizaram testes comparativos com diferentes interpoladores, inclusive o *Spline*, para realizar a análise espacial da precipitação pluviométrica no estado de São Paulo. Análise semelhante foi realizada por Campos (2010), que utilizou este método para a interpolação da estimativa de temperaturas médias no Brasil.

Para a elaboração dos mapas de irradiação solar, foram testados os três interpoladores (IDW, Krigagem e Spline) por meio do *software* ArcGIS 10.3 e avaliados com relação a sua precisão entre os dados medidos e o resultado interpolado, bem como a avaliação do resultado visual.

4.2.3. Localização das áreas de maior aptidão

Para a elaboração dos mapas e localização das áreas com maior aptidão para geração de energia solar fotovoltaica no Estado do Rio Grande do Sul foram utilizados os resultados dos mapas de irradiação solar no plano inclinado e os mapas das linhas de transmissão e as subestações da Rede Básica.

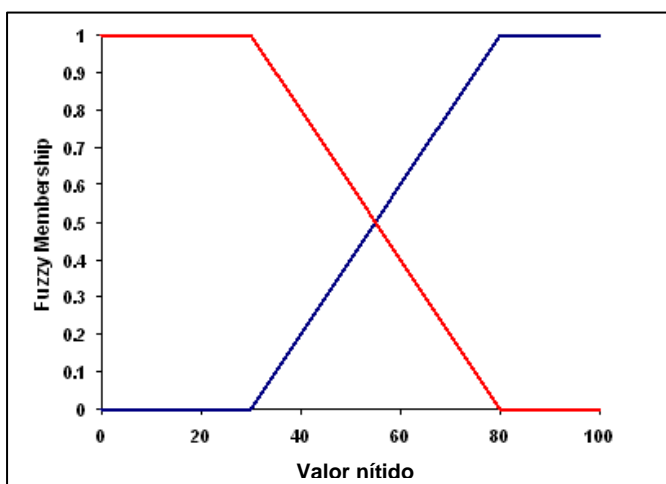
Para a avaliação dos mapas de irradiação solar, se considerou as áreas que apresentaram os maiores valores médios anuais, localizados dentro das áreas interpoladas pela metodologia escolhida. Para restringir as áreas com maior potencial e indicar as áreas com maior potencial solar, delimitou-se dois intervalos de valores, onde os locais com irradiação inferiores a 5,17 kWh/m².dia⁻¹ foram descartados e consideradas apenas as áreas com valores superiores a 5,18 kWh/m².dia⁻¹, valor

mínimo observado nas regiões do país que foram avaliadas e consideradas vencedoras do 2º LER/2015. Assim, foi gerado o mapa, localizando as regiões com potencial, considerando os índices mínimos de irradiação.

Foram utilizados os mapas de uso e cobertura do solo desenvolvidos pelo Laboratório de Geoprocessamento do centro de Ecologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ano base 2009. O mapa de declividades foi gerado a partir dos mapas de Modelo Digital de Elevação (MDE) disponibilizados pelo site do *U.S. Geological Survey* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Para os mapas de limite estadual, lagos, rede hidrográfica e rodovias foi utilizada a base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul na escala 1:50.000, realizada pelo Laboratório de Geoprocessamento da UFRGS (HASENACK; WEBER, 2010). Os mapas das subestações da Rede Básica e linhas de transmissão foram solicitadas à EPE, por meio do Sistema de Informações ao Consumidor. Estes mapas gerados, tratados e manipulados por meio do *software* ArcGIS 10.3.

Para a verificação dos critérios para avaliar a aptidão para receber uma USF foi utilizada a lógica *fuzzy*, por meio da função linear a fim de realizar a padronização das bases de dados e avaliar os índices de irradiação, as distâncias das linhas de transmissão, dos sistemas viários, dos núcleos urbanos e declividades. A lógica *fuzzy* do tipo linear define uma função de uma associação difusa através da transformação linear entre o valor mínimo especificado, atribuindo 0 para o valor mínimo e 1 para o valor máximo, como pode ser verificado na Figura 31.

Figura 31 - Gráfico de distribuição de valores pela lógica *fuzzy*



Fonte: Adaptado pelo Autor do *software* ArcGIS 10.3.

Aa bases categórica, como uso e cobertura do solo foi reclassificada, dando-lhes pesos os de 0 nas áreas restritas e 1 nas áreas mais aptas.

A região que apresentou a maior irradiação solar e que dispunha de linhas de transmissão de energia da Rede Básica foi destacada e criou-se um polígono para a delimitação da área onde foram realizadas as avaliações. Este procedimento facilitou a localização das áreas mais aptas e delimitou a área de estudos do presente trabalho.

Para a determinação das distâncias das linhas de transmissão de energia do Rio Grande do Sul, utilizou-se a ferramenta *euclidean distance*, implementada pelo *software* ArcGIS 10.3, gerando uma imagem do tipo *raster*, em que cada pixel (30 x 30 metros) correspondeu a um valor de distância da linha de transmissão. Após este procedimento, foi realizado o corte da imagem dentro do polígono gerado, a fim de se avaliar as distâncias dentro da área delimitada. Na classificação pelo método de *fuzzy* ponderou-se que a maior distância das linhas de transmissão recebeu o valor 0, ou seja, menor aptidão.

O mapa de distâncias das estradas e rodovias também foi realizada utilizou-se o *software* ArcGIS 10.3, com a base vetorial do IBGE de 2010, na escala 1:50.000. Aplicou-se o mesmo método utilizado para as linhas de transmissão e gerado o mapa no formato *raster*, com a mesma resolução espacial. Utilizando a classificação do método *fuzzy*, a maior distância das rodovias recebeu o valor 0, correspondendo a menor aptidão.

A conformação da declividade do terreno na região se deu considerando as classes de declividades sugeridas por Pereira e Lombardi Neto (2004), como podem ser verificadas na Tabela 4. Esta informação é importante para a definição dos locais para a implantação de uma usina solar. Carrión et al (2008) indica a inclinação máxima de 30%, desde que a mesma esteja orientada em direção ao norte (hemisfério sul).

Tabela 4 - Classes de declividades do terreno

Declividade		Relevo
Classe	(%)	Tipo
A	0 a 3	Plano
B	3 a 8	Suave ondulado
C	8 a 13	Moderadamente ondulado
D	13 a 20	Ondulado
E	20 a 45	Forte ondulado
F	>45	Montanhoso e escarpado

Fonte: Adaptado pelo autor de Pereira e Lombardi Neto (2004).

Foram utilizadas as bases de MDE com resolução espacial de 30 metros, oriundas do *U.S. Geological Survey*. Utilizou-se 4 imagens, visto que o quadrante de cada uma delas não contemplou completamente o polígono da região selecionada. Utilizou-se a ferramenta *raster mosaic*, gerando assim, um arquivo *raster* único. A classificação pelo método *fuzzy* limitou a 20% a inclinação máxima aceitável, ou seja, as inclinações maiores que 21% receberam valor 0.

Os mapas de distâncias de linhas de transmissão, rodovias e declividade do terreno são considerados aspectos econômicos para Uyan (2013). Peraza (2013) considera o parâmetro de distância de linhas de transmissão como limitante para investimentos em usinas solares, visto o alto custo de implantação por quilômetro. Com isto, as menores distâncias e declividade receberam os maiores pesos, juntamente com o parâmetro de irradiação solar para a elaboração da matriz de pesos de fatores.

O parâmetro de uso e cobertura do solo é considerado um dos fatores ambientais mais importantes a serem considerados. Para Uyan (2013), as áreas agricultáveis ou estéreis são as mais indicadas para a implantação de uma usina solar. Para avaliação deste critério, utilizou-se o mapa de uso e cobertura do solo do bioma Pampa, já classificado, disponibilizado pelo Laboratório de Geoprocessamento do centro de Ecologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em escala 1:250.000. A classificação de usos do mapa são cobertura natural campestre, cobertura natural florestal, cobertura natural do mosaico campo-floresta (capoeira),

corpos d'água naturais, áreas agrícolas e áreas urbanas. Este mapa foi recortado no polígono da área a ser estudada e foi reclassificado, onde as áreas de cobertura natural florestal, corpos d'água natural e áreas urbanas receberam o valor 0, ou seja, são consideradas áreas restritas. As áreas agrícolas receberam valor 1, cobertura natural campestre recebeu valor 0,9 e cobertura natural do mosaico campo-floresta recebeu valor 0,7. As demais áreas, como florestas, áreas urbanas ou áreas úmidas receberam o valor 0, considerando estes aspectos geomorfológicos inaptos para a implantação da USF.

Por meio deste mapa as áreas também foram reclassificadas para ponderar as distâncias dos centros urbanos. As áreas urbanas foram classificadas com o valor 0 e as demais áreas receberam valor 1. Desta forma, foi possível utilizar a ferramenta *euclidean distance*, no *software* ArcGIS 10.3. Neste caso, a maior distância recebeu valor 1, máxima aptidão e a menor distância recebeu valor 0. De acordo com Uyan (2013), pouca distância de áreas urbanas ou mesmo residências em áreas rurais pode causar impactos negativos à população, por este motivo, a distância mínima recomendada para estas áreas é de 500 m.

O mapa de irradiação solar da região também foi reclassificado no *software* ArcGIS 10.3, onde o valor máximo de irradiação recebeu o valor 1, e o menor valor recebeu o valor 0, pelo método *fuzzy*, gerando, também, um mapa com as áreas com maior irradiação solar.

A ponderação dos fatores foi realizada por meio do processo analítico hierárquico (AHP). O preenchimento da planilha foi realizado levando em consideração a avaliação dos critérios observados por Carrión et al. (2008), Sánchez-Lozano et al. (2013) e Uyan (2013). A planilha da matriz AHP é demonstrada no Quadro 3 abaixo.

Quadro 3 - Matriz AHP utilizada com as seis variáveis utilizadas

	Irradiação	Declividade	Uso do solo	Dist. LT	Dist. cidades	Dist. rodovias
Irradiação	1					
Declividade		1				
Uso do solo			1			
Dist. LT				1		
Dist. cidades					1	
Dist. rodovias						1

Fonte: Do Autor, 2017.

Desta forma, gerou-se o mapa das áreas com maior aptidão e índices de irradiação solar no plano inclinado, associado às características gerais, tanto geomorfológicas, ambientais e técnicas para a implantação de uma USF.

A matriz AHP teve o Índice de Consistência (IC) avaliado, para que a matriz AHP gerada tenha consistência válida. De acordo com Silva (2007) e Uyan (2013), para que essa matriz seja considerada válida, o IC deve ser menor que 0,1, caso contrário deverá ser realizada nova ponderação dos dados de entrada. Esse índice é calculado utilizando-se o $\lambda_{\text{máx}}$, encontrado por meio da média dos resultados da Matriz de Consistência do método AHP, conforme a equação 12.

$$IC = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n - 1} \quad (12)$$

Em que:

IC - Índice de consistência;

$\lambda_{\text{máx}}$ - Autovalor máximo da matriz;

n - Número de linhas e colunas.

Para Saaty (1990), deve-se utilizar ainda a Razão de Consistência (RC), considerando-se o IC e o Índice Randômico (IR), que varia conforme o n da amostra, de acordo com a equação 13.

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (13)$$

Onde IR é o índice de consistência aleatória. Os valores de IR para diferentes números de n são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Tabela de índice de consistência aleatória

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Fonte: Saaty (1991).

4.2.4. Áreas de restrição e agregação de fatores

Após a reclassificação dos mapas pela lógica *fuzzy*, através da ferramenta *fuzzy membership*, nativa do *software* ArcGIS 10.3, ou pela reclassificação das categorias, multiplicou-se os mapas *raster* pelo peso obtido na matriz AHP, obtendo, assim, o mapa parcial de aptidão com suas devidas relevâncias e pesos considerados.

Posterior ao mapa parcial, gerou-se uma máscara 0-1, com o objetivo de restringir as áreas que, em algum dos demais mapas recebeu atributo 0, ou seja, considerada área sem aptidão para a implantação da usina solar.

Este mapa foi gerado por meio da multiplicação dos mapas de distâncias de linhas de transmissão, distâncias de rodovias, distâncias de cidades, uso e ocupação do solo, declividade e irradiação solar, utilizando a ferramenta *raster calculator*, no *software* ArcGIS 10.3, desconsiderando-se os pesos dados na matriz AHP.

A geração do mapa final de aptidão se deu pela multiplicação do mapa parcial pela máscara 0-1, também se utilizando a ferramenta *raster calculator*, no *software* ArcGIS 10.3. Após, o mapa de recursos hídricos foi utilizado multiplicando-se juntamente com a máscara 0-1, a fim de gerar áreas de restrição.

Este mapa foi avaliado e verificou-se a estatística gerada pelo próprio *software*. A reclassificação se deu aplicando a ferramenta *reclassify*, onde utilizou-se o valor máximo dos pixels da imagem, indicado pelo programa e subtraiu-se deste valor o desvio padrão, obtendo, assim, um mapa com duas áreas, uma que reuniu maior aptidão, recebendo o atributo 1, e outra área que continha os demais valores, que

recebeu o valor 0, sendo descartada para o restante da avaliação. Para este descarte, converteu-se o mapa em formato *raster* gerado para polígonos e selecionou-se, na tabela de atributos, os pixels gerados com valor igual a 1, convertendo este mapa em um arquivo do tipo *raster*, contendo apenas as áreas que apresentaram a maior aptidão. Verificou-se, neste novo mapa, a tabela de atributos e selecionou-se apenas os polígonos com área maior que 60 hectares, área mínima necessária para a implantação de uma USF com potência instalada de 30 MWp.

A validação das áreas com maior aptidão geradas se deu utilizando-se o *software* Google Earth Pro 7.1.2.2041, onde comparou-se os polígonos obtidos com as imagens disponibilizadas, onde pôde ser avaliada a coerência da aptidão.

4.2.5 Projeto da usina solar fotovoltaica

De posse da avaliação e da identificação da melhor área para a implantação de uma USF no Rio Grande do Sul e dos mapas de aptidão técnica e ambiental para a implantação dos empreendimentos, foram realizados levantamentos para a instalação de uma usina no local que possa representar a melhor opção econômica.

Para isso, além das informações climáticas e geomorfológicas, foram verificadas as questões de disponibilidade de redes de transmissão de energia elétrica e subestações, bem como a infraestrutura logística próxima ao local mais apto a receber a usina.

Será proposta uma USF com potência instalada de 30 MWp, visto que a Resolução Normativa N° 481, de 17 de abril de 2012 estipula uma redução de 80% na tarifa do uso do sistema de transmissão (TUST) e na tarifa de uso do sistema de distribuição (TUSD) nos 10 primeiros anos e 50% após este período para usinas de fonte solar.

Para a escolha dos inversores, foi utilizado o *software* de simulação *Sunny Design* (versão *Sunny Design Web 3.54.0*), que se trata de um programa de computador de dimensionamento e planejamento de sistemas fotovoltaicos, em

diversos tipos de configurações. O sistema permite a simulação de forma otimizada, onde são informados a marca e modelo dos painéis fotovoltaicos, bem como a quantidade ou a potência total instalada (LEE; FREASON; RODDEN, 2011; ÁDÁM; BASKAI-SZABÓ; KISS, 2012; SEYR JUNIOR, 2014; VESCOVI; MENEGÁZ, 2014). Assim, o sistema sugeriu os tipos e modelos de inversores mais adequados a serem utilizados, podendo também realizar a avaliação econômica de acordo com o rendimento energético do sistema. Este sistema possui dados climáticos de diversas regiões, porém, no Rio Grande do Sul apenas os dados de Porto Alegre e Quaraí estão disponíveis.

De posse dos dados de irradiação solar e a definição da melhor área para a implantação da USF, realizou-se a simulação de projeto utilizando-se o *software* Sunny Design. Foi proposta a utilização de painel solar da marca Canadian Solar, modelo CS6U – 325, com potência de 325 Wp, disponível no mercado nacional e com configuração semelhante aos que foram utilizados nos últimos Leilões de Energia. Os inversores foram sugeridos pelo programa, com base na potência nominal proposta para a usina (30 MW). Foi definido o arranjo de inversores, propondo a utilização de inversores do tipo Central, com maior potência e capacidade de utilização em diferentes configurações.

As avaliações de produção diária e anual de energia em MWh foram realizadas utilizando a Equação 14, considerando a irradiação média diária obtida e as informações dos fabricantes dos painéis solares e dos inversores propostos. Para a obtenção da produção anual, multiplicou-se o valor diário por 365 dias.

$$P = I_t \cdot A_{mod} \cdot \eta_{REF} \cdot F_{\theta} \cdot F_t \cdot \eta_{INV} \quad (14)$$

Em que:

I_t – Irradiância total incidente no módulo (MWh/m²);

A_{mod} – Área total do módulo (m²);

η_{REF} – Eficiência do módulo dada pelo fabricante (%);

F_{θ} – Reflectância observada no vidro dos módulos fotovoltaicos (descritos por Duffie e Beckmann (1980) - 0,94);

F_t – Fator de correção conforme a temperatura do módulo fotovoltaico;

η_{INV} – Eficiência do inversor (%).

O fator de correção de temperatura foi obtido através da Equação 15. Utilizou-se os dados de temperatura máxima absoluta registrada na estação meteorológica mais próxima ao local do empreendimento, ajustando estes dados com a Equação 4.

$$F_t = [1 - 0,0045(T_{mod} - 25,15)] \quad (15)$$

Em que:

T_{mod} – Temperatura do módulo fotovoltaico (°C).

A produtividade final (Y_F) da usina será dada pela Equação 16, onde pretende-se estimar a produtividade fotovoltaica expressa em kWh/kWp.ano.

$$Y_F = \frac{E_R}{P_{NG}} \quad (16)$$

Em que:

E_R – Energia total produzida no ano (kWh);

P_{NG} – Potência nominal do gerador fotovoltaico (kW).

Foram desconsiderados, para fins deste trabalho, as perdas inerentes ao cabeamento elétrico, perdas associadas aos painéis fotovoltaicos e perdas inerentes aos inversores, desconsiderando as perdas no sistema elétrico de sistema de elevação de tensão.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Mapas de irradiação solar no plano inclinado

Conforme a metodologia descrita, geraram-se os dados de irradiação solar no plano inclinado para cada uma das 37 estações meteorológicas que tiveram os dados avaliados. A Tabela 7 apresenta os dados médios mensais e a média anual global.

Tabela 6 - Irradiação solar no plano inclinado.

	Irradiação solar no plano inclinado (kWh/m ² .dia ⁻¹)												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Alegrete	5,75	5,44	5,32	4,72	4,09	3,47	3,66	4,35	4,97	5,84	6,38	6,12	5,01
Bagé	6,47	6,33	6,15	5,26	3,83	3,23	3,51	4,40	5,07	5,69	6,55	6,66	5,26
Bento Gonçalves	5,77	5,69	5,39	5,05	3,95	3,46	3,55	3,80	4,30	5,05	5,81	6,44	4,85
Caçapava do Sul	6,07	5,83	5,44	4,84	3,74	3,37	3,87	4,39	5,12	5,23	6,41	6,70	5,08
Camaquã	5,70	4,86	4,16	4,37	3,72	3,09	3,15	3,74	4,14	4,79	5,59	6,08	4,45
Campo Bom	5,67	5,74	5,28	4,68	3,44	3,30	3,38	4,21	4,52	4,72	5,45	7,27	4,80
Canela	5,33	5,11	4,95	4,63	3,71	3,34	3,54	4,24	4,59	5,55	6,17	6,03	4,77
Canguçu	4,96	5,16	5,40	4,91	3,89	3,58	3,73	4,10	4,48	4,79	6,00	6,01	4,75
Chuí	6,19	3,80	4,01	4,33	3,93	3,83	4,06	3,57	3,96	4,43	4,55	6,69	4,45
Cruz Alta	5,75	4,34	4,47	4,40	3,51	3,44	3,85	4,65	5,14	5,67	6,35	6,31	4,82
Dom Pedrito	5,97	5,60	5,41	4,44	3,73	3,32	3,52	4,37	5,16	5,86	7,03	6,83	5,10
Erechim	5,92	5,83	5,66	5,13	3,75	3,30	3,99	4,65	4,94	5,25	5,87	6,41	5,06
Frederico Westphalen	6,08	5,08	5,36	5,07	4,13	3,60	3,94	4,59	4,95	5,42	5,90	6,18	5,02
Ibirubá	6,15	5,55	5,42	5,12	3,79	3,54	3,62	2,44	4,19	4,89	5,86	6,31	4,74
Jaguarão	6,20	5,49	5,62	4,82	3,66	3,17	3,27	3,84	4,61	5,24	6,19	5,89	4,83
Lagoa Vermelha	5,56	5,28	5,71	5,25	4,13	3,75	4,10	4,71	5,01	4,93	5,80	5,97	5,02
Mostardas	5,62	5,08	5,85	5,11	4,24	3,32	3,55	4,15	4,94	5,26	6,67	6,76	5,05
Palmeira das Missões	5,69	5,34	5,39	4,86	4,03	3,06	4,00	4,57	4,72	5,05	5,55	5,57	4,82
Passo Fundo	6,00	5,75	5,23	4,65	3,63	3,64	4,10	4,39	4,51	4,85	5,25	6,26	4,85
Porto Alegre	5,71	5,49	5,02	4,26	3,09	2,90	3,17	3,68	4,38	5,13	5,84	5,95	4,55
Quaraí	6,51	5,38	5,64	5,02	3,87	3,56	3,63	4,40	5,12	5,99	6,97	7,04	5,26

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Rio Grande	5,46	5,01	4,82	4,16	3,09	2,69	2,84	3,46	4,04	4,42	5,42	6,04	4,29
Rio Pardo	5,90	5,74	5,30	4,55	3,76	3,03	3,26	3,92	4,42	5,23	6,27	6,43	4,82
Santa Maria	6,00	5,74	5,31	4,54	3,60	3,14	3,26	3,88	4,31	4,86	5,50	6,28	4,70
Santa Rosa	6,13	5,82	5,77	4,84	3,49	2,37	3,51	3,93	4,05	4,67	5,30	6,22	4,68
Santiago	5,70	5,44	5,79	5,48	4,17	3,90	4,21	4,91	4,97	5,61	6,46	6,32	5,25
Santo Augusto	5,94	5,68	5,25	4,49	3,56	3,11	3,22	3,84	4,27	4,81	5,44	6,21	4,65
São Borja	6,27	4,58	4,90	4,54	3,34	3,30	4,07	4,86	5,55	5,96	6,59	6,43	5,03
São Gabriel	6,40	5,43	5,47	5,05	3,84	3,48	3,10	3,71	4,17	5,73	6,78	6,88	5,00
São José dos Ausentes	4,93	5,00	5,22	4,95	4,09	3,83	4,23	4,60	4,94	4,87	5,41	5,77	4,82
São Luiz Gonzaga	6,25	5,74	5,78	4,43	3,54	2,70	3,28	4,32	5,01	5,73	6,51	6,47	4,98
Soledade	6,09	5,84	4,88	5,36	4,42	3,79	4,09	4,81	5,01	5,64	6,29	5,26	5,12
Teutônia	4,59	4,54	5,49	5,54	4,57	3,92	4,23	4,98	5,18	5,83	6,50	5,44	5,07
Torres	5,49	4,88	4,80	4,79	3,67	3,44	3,95	4,43	4,94	5,31	5,93	6,07	4,81
Tramandaí	5,70	5,48	5,49	5,15	4,11	3,57	3,53	3,78	4,14	5,49	6,20	5,89	4,88
Uruguaiana	6,62	6,20	5,97	4,91	3,75	3,17	3,18	4,19	4,44	5,44	6,41	6,88	5,10
Vacaria	5,29	5,07	4,76	4,03	4,13	3,82	4,28	4,80	5,29	5,51	5,93	5,75	4,89
Mínima	4,59	3,80	4,01	4,03	3,09	2,37	2,84	2,44	3,96	4,42	4,45	5,26	4,29
Média	5,83	5,36	5,29	4,80	3,81	3,37	3,66	4,21	4,69	5,26	6,03	6,27	4,88
Máxima	6,62	6,33	6,15	5,54	4,57	3,92	4,28	4,98	5,55	5,99	7,03	7,27	5,26

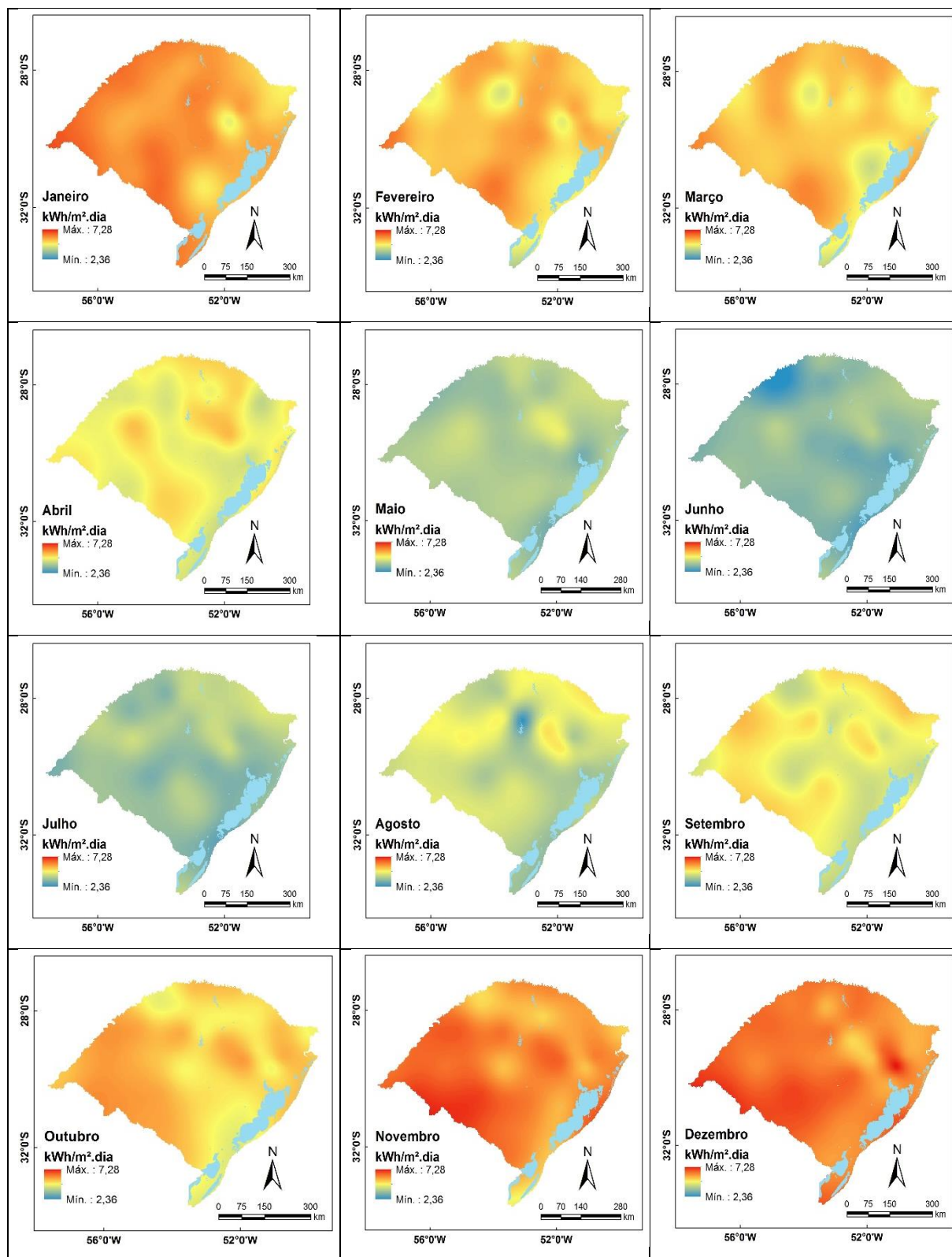
Fonte: Do Autor, 2017.

Através dos dados é possível observar a pouca variabilidade média de irradiação solar no plano inclinado no Rio Grande do Sul, variando apenas 18,5% entre o valor máximo e o mínimo observado. Os maiores índices médios foram observados na região da estação meteorológica de Bagé e Quaraí, com 5,26 kWh/m².dia⁻¹, Santiago, como 5,25 kWh/m².dia⁻¹, já o menor valor observado observou-se na região de Rio Grande, com uma média de 4,29 kWh/m².dia⁻¹. Estes valores são superiores aos encontrados por Martinazzo (2004), muito em função de a irradiação solar fora medida apenas no plano horizontal e não inclinado. Porém, a média de irradiação solar observada (4,88 kWh/m².dia⁻¹) é próxima ao descrito por Pereira et al. (2006), onde aponta a região sul do Brasil com potencial anual médio de 5,00 kWh/m².dia⁻¹.

Foi utilizado o interpolador *Spline*, visto que apresentou a melhor qualidade visual dos mapas sem comprometer, de maneira significativa os valores de irradiação obtidos das estações meteorológicas. De acordo com Pereira et al. (2006), a interpolação de dados climatológicos pode apresentar imprecisão nos dados quando as distâncias entre as bases de coletas de dados forem superiores a 45 km.

Os mapas mensais gerados podem ser visualizados no Quadro 4.

Quadro 4 - Mapas mensais de irradiação solar no plano inclinado



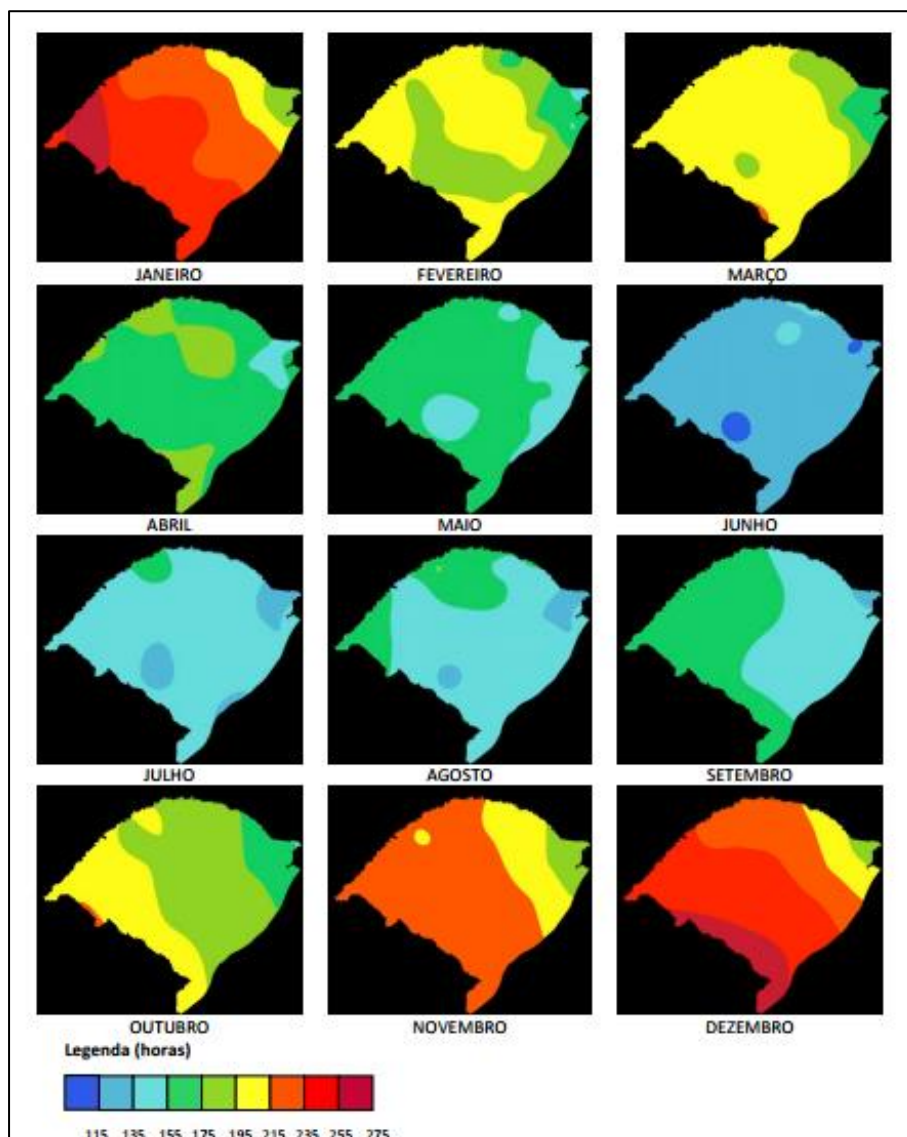
Fonte: Do Autor, 2017.

Os mapas gerados apontam para a região oeste do Estado, nas áreas de fronteira com a Argentina e o Uruguai como as áreas com maior destaque no potencial

de irradiação solar nos meses de outubro, novembro, dezembro e janeiro. Os meses de fevereiro, março, abril e setembro há uma variação grande na irradiação observada no território do Estado, onde regiões distintas apresentam índices de irradiação média mais elevadas, mas ainda prevalecendo a região da fronteira oeste como a que recebe maiores quantidades de energia. Durante os meses de maio, junho, julho e agosto há pouca variação nos índices de irradiação solar no Rio Grande do Sul.

Nota-se semelhança entre os mapas mensais de irradiação solar no plano inclinado gerados com os mapas de horas de insolação desenvolvidos por Rossato (2011), principalmente entre os meses de janeiro e abril e entre outubro e dezembro, como pode ser visualizado na Figura 32.

Figura 32 - Mapas de horas de sol mensal

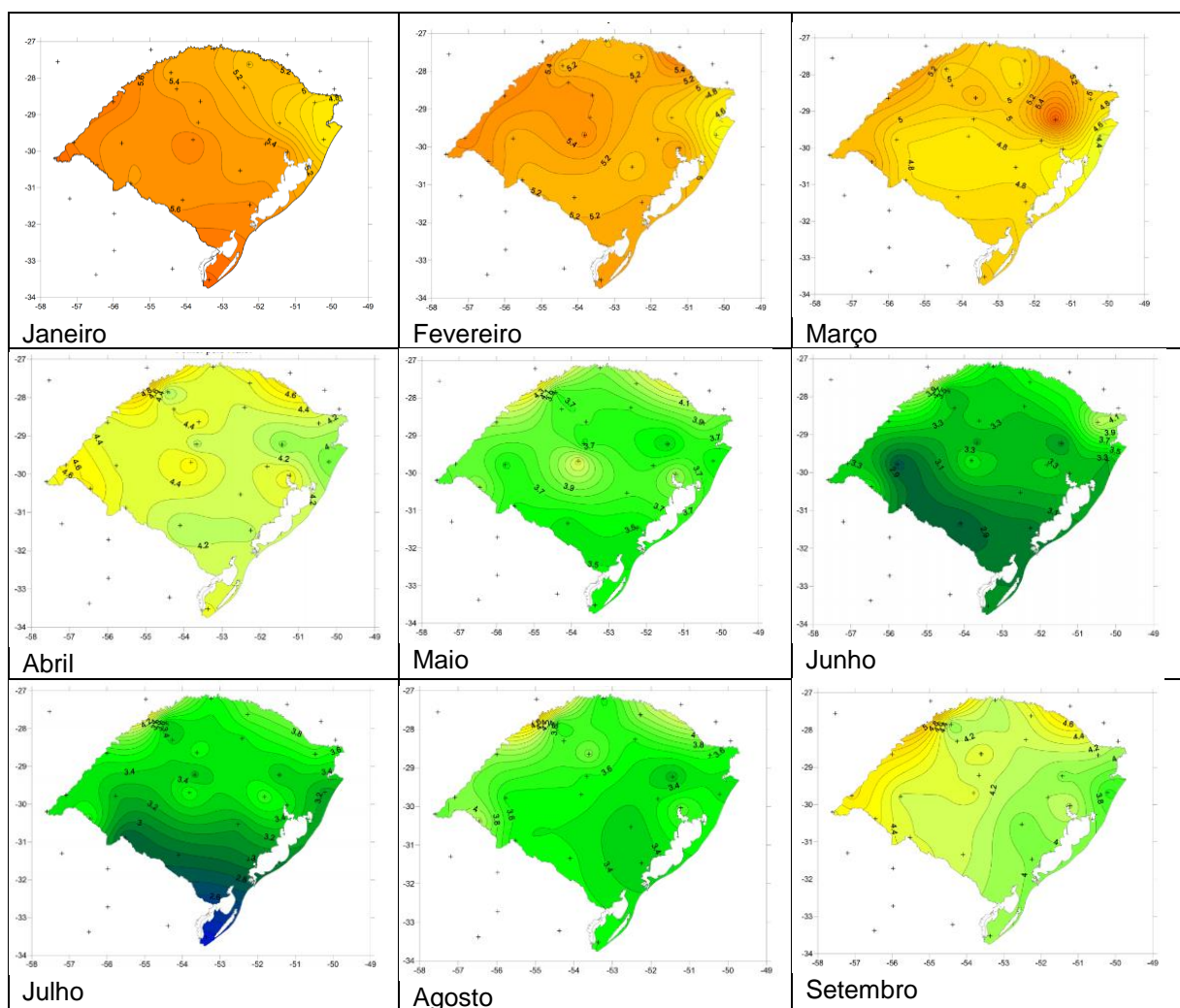


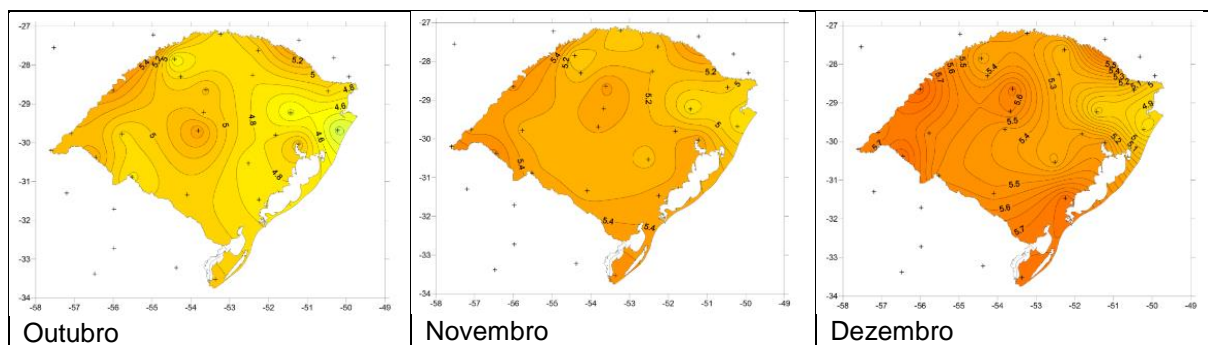
Fonte: Rossato (2011).

Ainda, de acordo com Rossato (2011), a variação da umidade relativa do ar provoca uma divisão das regiões do Estado, onde as regiões leste/sudeste possuem ar mais úmido, enquanto nas regiões oeste/noroeste o ar é mais seco. Isso explica o fato das regiões próximas a grandes lagos possui índices menores de irradiação solar que nas demais regiões, já que ocorre com maior frequência a formação de nevoeiro. A variação sazonal da temperatura não demonstrou ser determinante para os índices de irradiação solar.

Os mapas mensais também apresentaram semelhança com os desenvolvidos por Peraza (2013), que utilizou os dados de irradiação no plano horizontal desenvolvidos por Martinazzo (2004), aplicando o software RADIASOL 2 para gerar mapas de irradiação no plano inclinado a 25°, como pode ser visualizado no Quadro 5.

Quadro 5 - Variabilidade da irradiação solar mensal

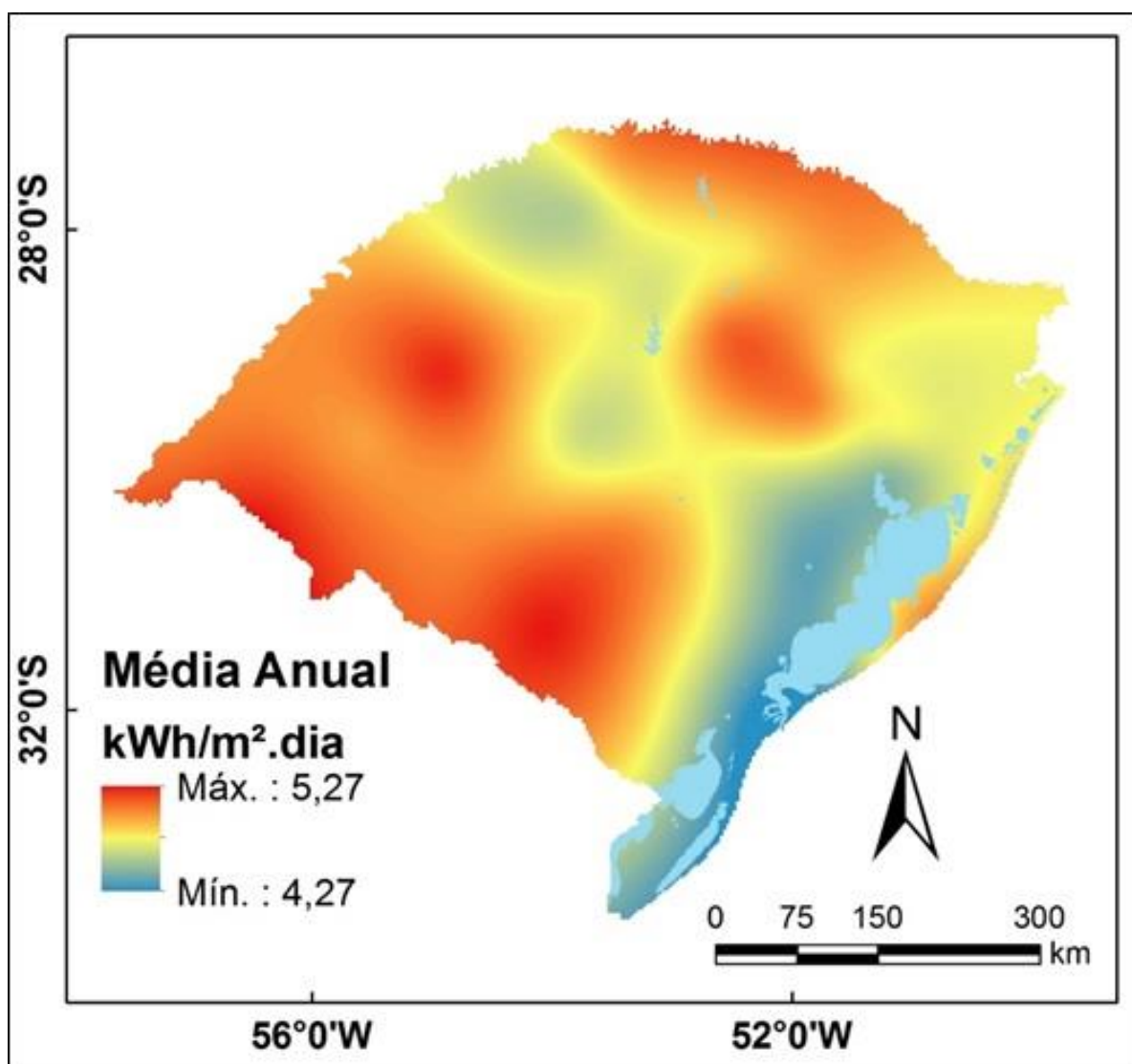




Fonte: Adaptado de Peraza (2013).

Além dos mapas mensais, foi desenvolvido o mapa médio anual de irradiação solar no plano inclinado, que pode ser visualizado na Figura 33.

Figura 33 - Mapa de irradiação solar no plano inclinado - média anual



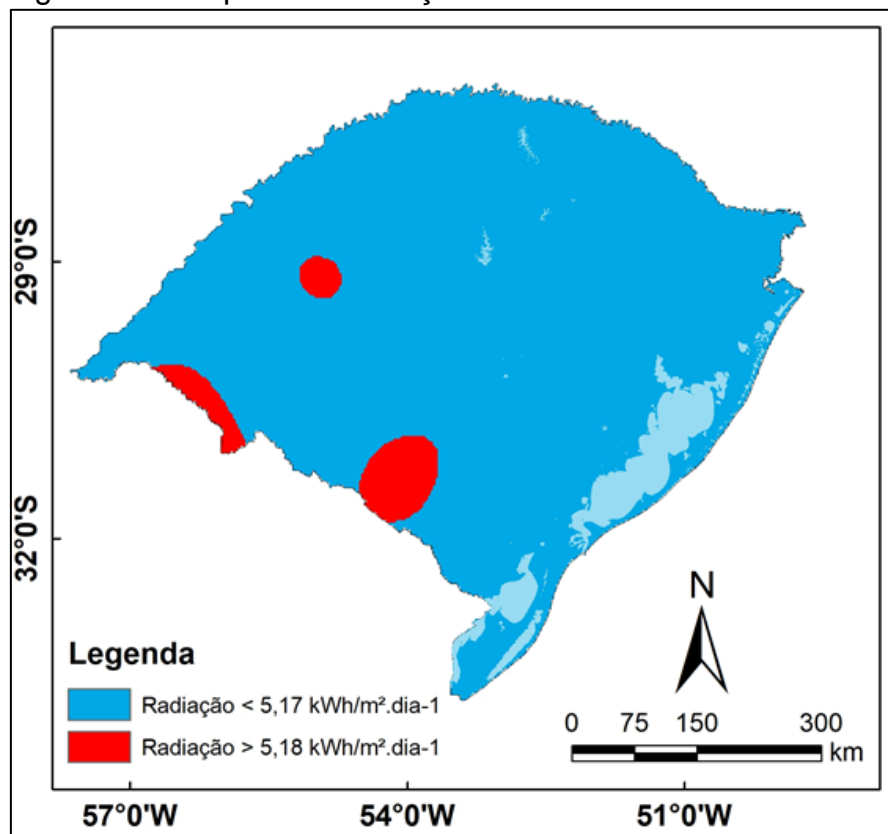
Fonte: Do Autor, 2017.

O mapa ressaltou a região de fronteira com o Uruguai e parte da fronteira com a Argentina como a de maior potencial, mas também identificou focos de capacidade nas regiões norte e parte da região do Vale do Taquari. A região do entorno da Lagoa dos Patos e litoral sul do Estado apresentaram os menores índices de irradiação, possivelmente por conta da grande influência da umidade relativa do ar, muito embora, a parte mais ao sul desta região seja a que recebe a menor precipitação média anual, entre 1200 e 1500 mm (ROSSATO, 2011).

5.2. Avaliação de aptidão de áreas

As regiões com potencial para a implantação, considerando o valor mínimo de irradiação de $5,18 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}^{-1}$ podem ser observadas na Figura 34. A área abrangida por estes locais é de 4% da área do Estado, ou 1.126.992 hectares.

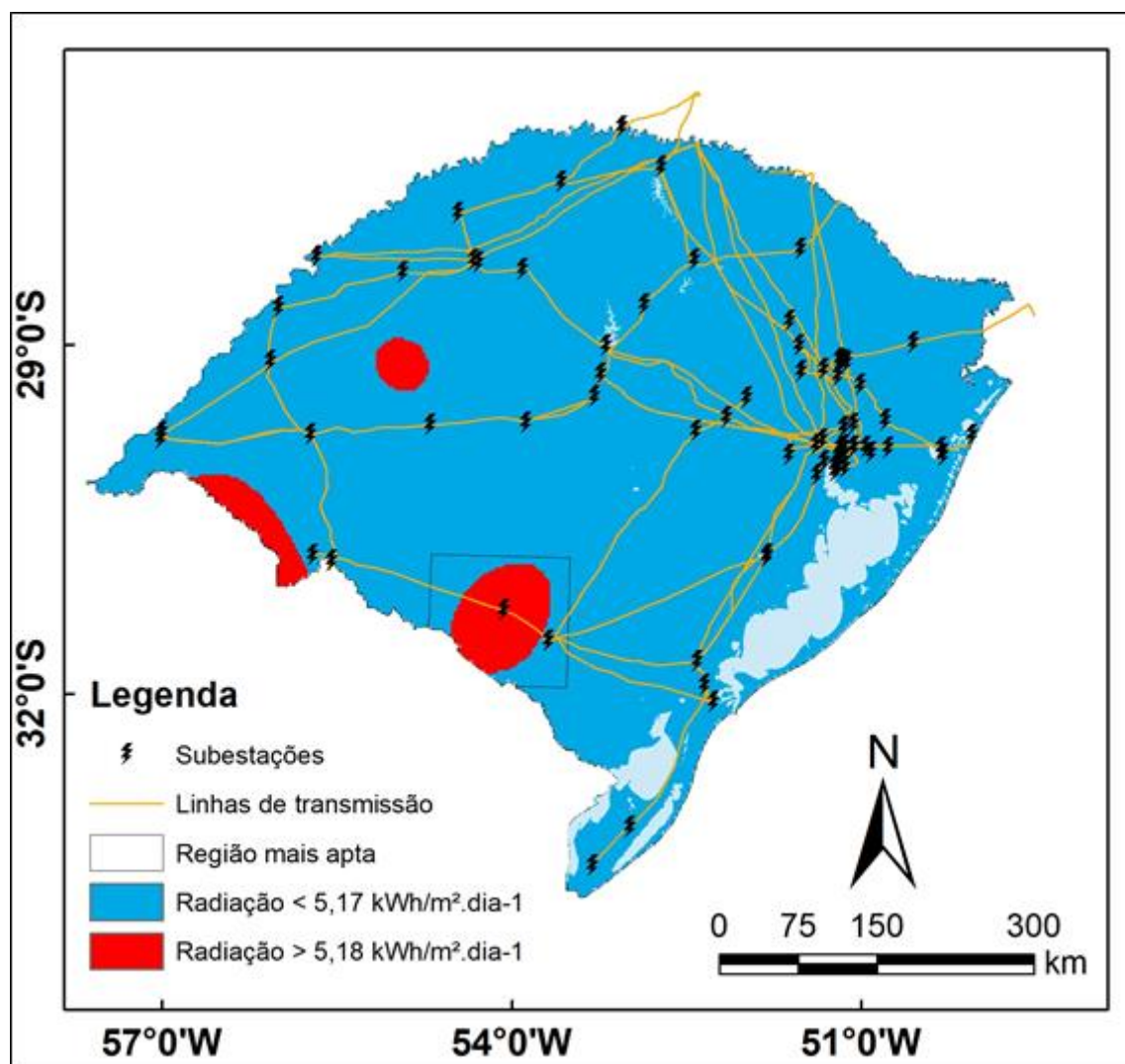
Figura 34 – Mapa de localização das áreas com os maiores índices de irradiação.



Fonte: Do Autor, 2017.

De acordo com Peraza (2013), a disponibilidade de linhas de transmissão de energia é fator determinante para viabilizar economicamente empreendimentos de geração de energia no Estado. Desta forma, localizou-se as linhas de transmissão da Rede Básica e verificou-se a disponibilidade nas regiões que apresentaram os melhores potenciais de irradiação solar. As regiões indicadas no mapa gerado estão localizadas na porção Sudoeste, próximos da fronteira com o Uruguai e Centro-oeste do Estado. A Figura 35 apresenta o mapa das linhas de transmissão do Estado e mostra a região que conta com este recurso para o escoamento da energia solar a ser produzida.

Figura 35 - Mapa da infraestrutura elétrica do Rio Grande do Sul



Fonte: Do Autor, 2017.

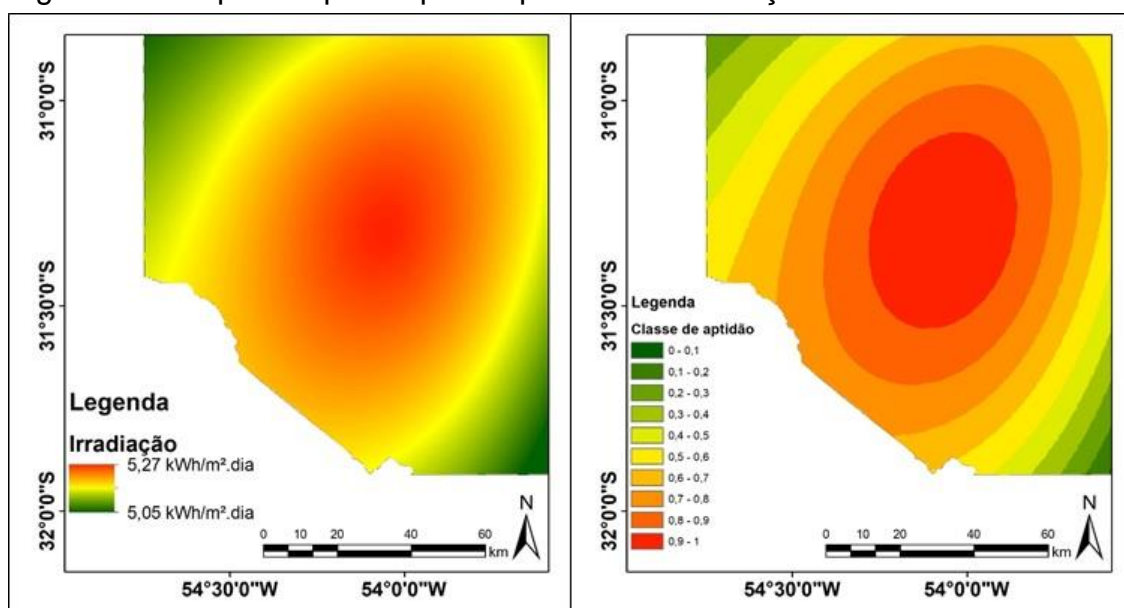
A região identificada como Região mais apta apresenta a melhor infraestrutura elétrica para o escoamento da energia a ser gerada, pois possui duas subestações de energia, uma com capacidade de transformação de 225 MW (230/69 kV) e outra de 672 MVA (525/230 kV), além da linha de transmissão da Rede Básica (230 kV) (ONSc, 2017). Nas demais regiões, a distância mínima da área com maior irradiação é superior a 50 km de subestação de energia elétrica ou de linha de transmissão da Rede Básica.

Devido a disponibilidade de infraestrutura elétrica na região, esta área foi escolhida para a realização da análise multicriterial e os levantamentos necessários para localizar as áreas mais aptas para a implementação do projeto da USF. Para isto, gerou-se um polígono abrangendo área de 1.210.893,75 ha da região da Campanha Meridional do Rio Grande do Sul.

- **Radiação solar**

A irradiação solar observada na região varia entre 5,05 e 5,26 kWh/m².dia⁻¹. Estes valores estão próximos do valor mínimo observados no 2º LER/2015 (5,17 kWh/m².dia⁻¹). As áreas mais aptas receberam valor 1, sendo consideradas mais aptas para a implantação do empreendimento. As áreas do mapa que indicou irradiação de 5,05 kWh/m².dia⁻¹ foram considerados como inaptas, ou, classificadas como 0 na classe de aptidão, como pode ser visualizado na Figura 36. A área central apresentou os maiores índices de irradiação. Isto não significa que as demais áreas apresentem índices tão menores que os medidos pela estação meteorológica. Por conta distância entre o ponto de amostragem, juntamente com os índices registrados nas estações vizinhas e as áreas onde os níveis de irradiação foram interpolados, foi observada esta variação de 0,21 kWh/m².dia⁻¹ na área de estudo.

Figura 36 - Mapa de aptidão para o parâmetro irradiação solar



Fonte: Do Autor, 2017.

- **Declividade**

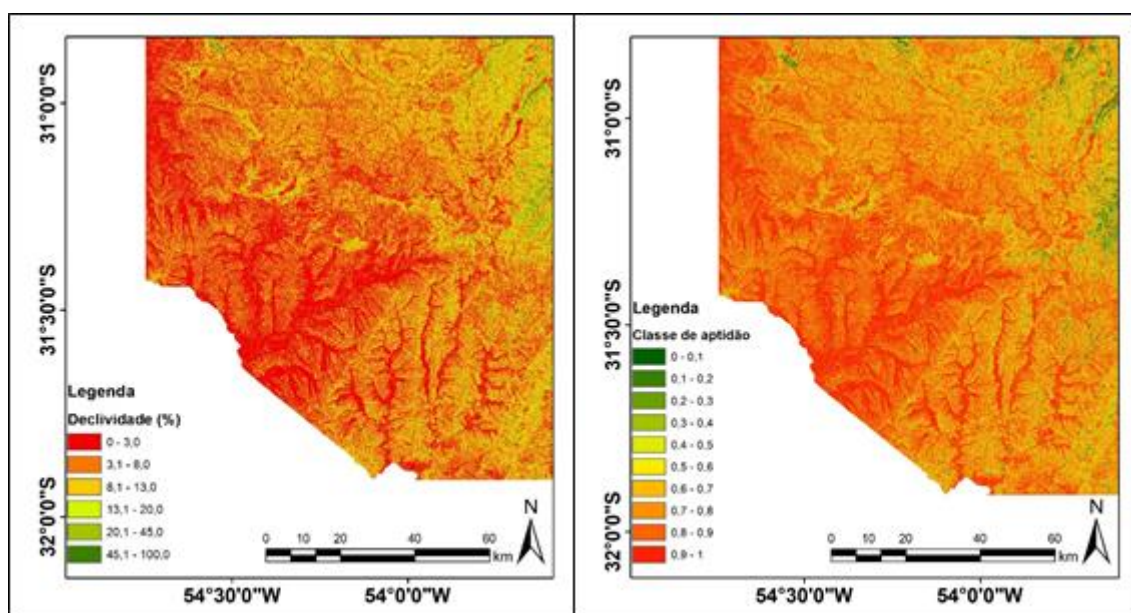
A declividade observada na região varia entre 0 e 77%. A relação da área e sua representação pode ser visualizada na Tabela 8. A maior parcela do terreno possui declividade até 8%, representando mais de 73% da área total da região, indicando pouca irregularidade e boa aptidão para a implantação da USF, o que pode ser visualizado na Figura 37.

Tabela 7 - Análise da declividade da região

Declive (%)	Relevo	Área (ha)	Percentual da área
0 – 3	Plano	294.331,68	24,31%
3 – 8	Suave ondulado	592.200,93	48,91%
8 – 13	Moderadamente ondulado	234.395,47	19,36%
13 – 20	Ondulado	77.446,14	6,40%
20 – 45	Forte ondulado	12.501,11	1,03%
>45	Montanhoso e escarpado	18,413	0,002%
TOTAL		1.210.893,75	100%

Fonte: Do Autor, 2017.

Figura 37 - Mapa de aptidão para o parâmetro declividade



Fonte: Do Autor, 2017.

- **Uso e ocupação do solo**

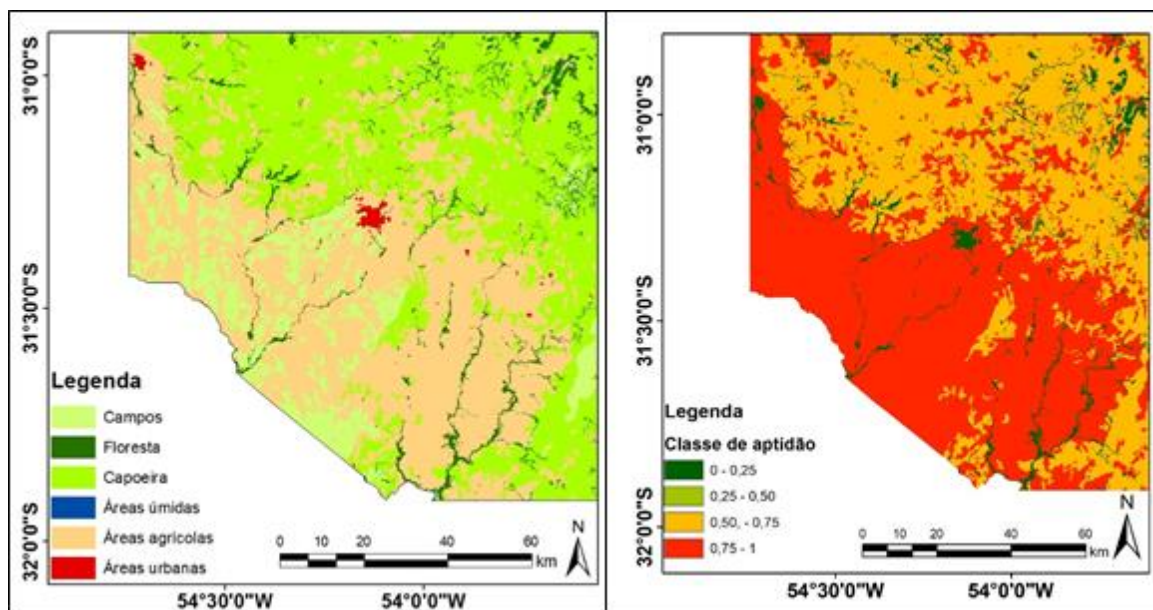
Com relação ao uso e ocupação do solo, a variabilidade de classes está demonstrada na Tabela 9. É possível observar que a maior parcela de tipos de usos está concentrada em áreas agrícolas, com 45,40% de ocupação. Estas áreas, em conjunto com áreas de campos, perfazem 57,12% da área, o que demonstra a propensão a utilização da área para a implantação da usina solar. As áreas de floresta, áreas úmidas e áreas urbanas foram classificadas como inaptas para receber o empreendimento. A tipologia de uso, bem como a classificação conforma a aptidão da área podem ser visualizadas na Figura 38.

Tabela 8 - Usos do solo

Uso	Área (ha)	Percentual da área
Campos	141.922,38	11,72%
Floresta	36.751,89	3,04%
Capoeira	476.341,43	39,34%
Áreas úmidas	300,49	0,02%
Áreas agrícolas	549.729,63	45,40%
Áreas urbanas	5.847,94	0,48%
TOTAL	1.210.893,75	100%

Fonte: Do Autor, 2017.

Figura 38 - Mapa de uso e cobertura do solo (E) e aptidão deste parâmetro (D)

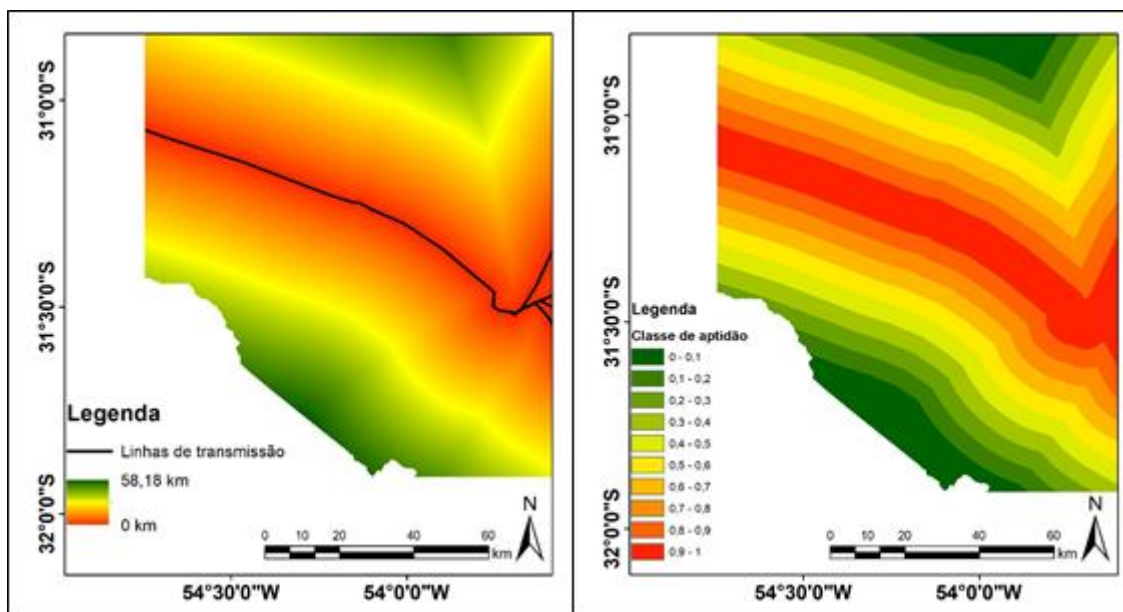


Fonte: Do Autor, 2017.

- **Distância de linhas de transmissão**

O mapa de distância da linha de transmissão de energia da Rede Básica (figura 39) apontou a maior distância de 58,18 km, ao Sul da região, no limite com o Uruguai. Ao Norte, a maior distância verificada foi de 54,02 km. Distâncias superiores a 50 km foram consideradas inaptas, devido ao alto custo de implantação de linhas de transmissão e subestação para o escoamento de energia elétrica.

Figura 39 - Mapas de distância (E) e de distância de linhas de transmissão (D)

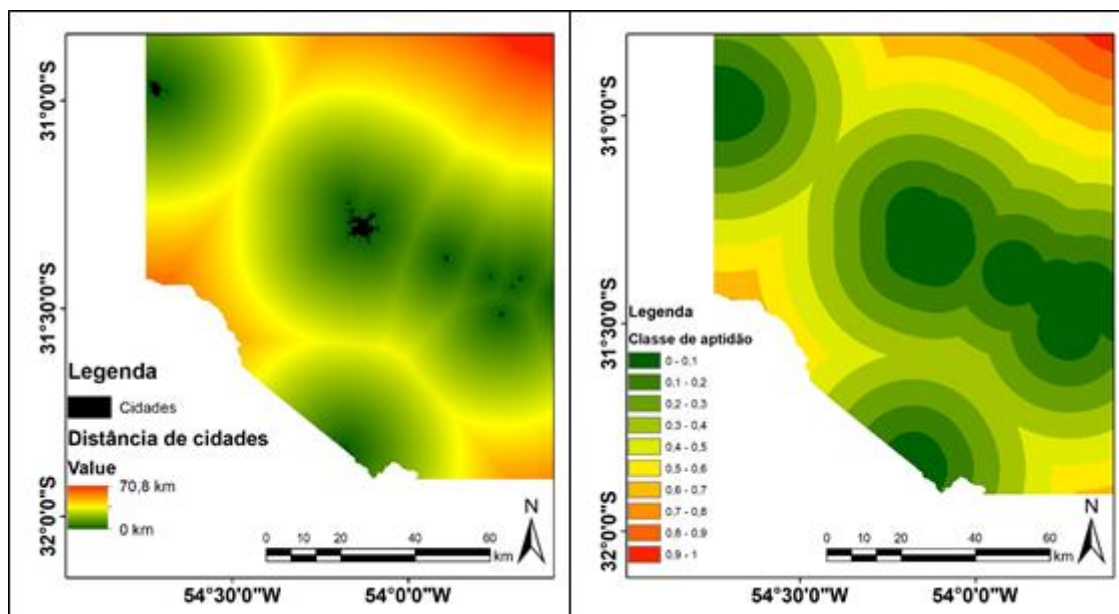


Fonte: Do Autor, 2017.

- **Distância de cidades**

A maior distância dos centros urbanos obtidos foi de 70 km. O mapa de aptidão gerado pode ser visualizado na Figura 40 e foi gerado propondo que distâncias inferiores a 500 metros de centros urbanos fossem consideradas inaptas, ou seja, nestes locais não haveria a possibilidade de implantação de uma usina solar. Observa-se, pelo mapa, que as áreas, quanto próximo aos centros urbanos menor foi considerada a aptidão para a implantação da USF.

Figura 40 - Mapa de distância (E) e aptidão por distância de cidades (D)

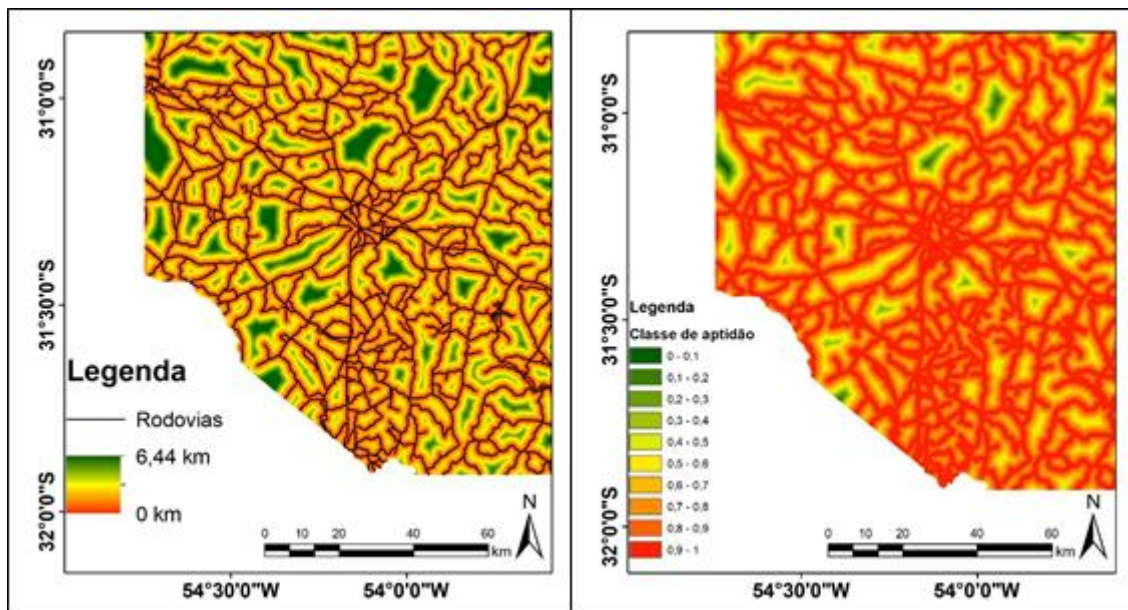


Fonte: Do Autor, 2017.

- **Distância de rodovias**

O mapa de infraestrutura logística apontou que a região conta com 846,58 km de rodovias estradas ou arruamentos, com distâncias sempre inferiores a 6,45 km entre a via e as áreas desprovidas de acesso. A Figura 41 mostra que a região conta com rede viária que possibilita o transporte de equipamentos e insumos, sem que haja necessidade de maiores investimentos.

Figura 41 - Mapa de distâncias (E) e de aptidão por distância de rodovias (D)

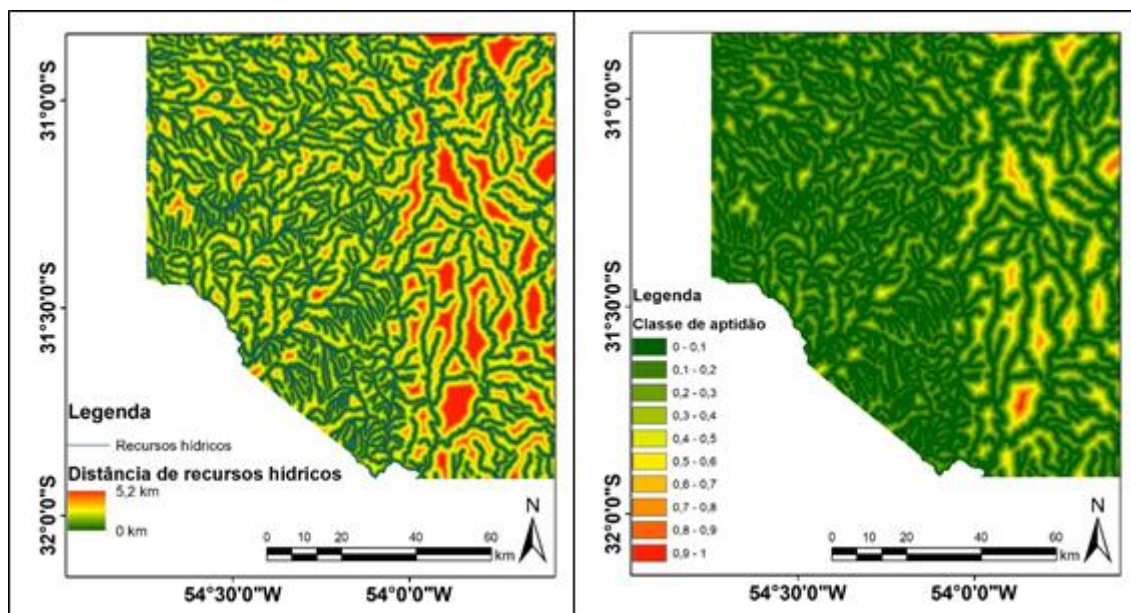


Fonte: Do Autor, 2017.

- **Recursos hídricos**

O mapa de recursos hídricos mostrou que a região conta com mais de 5.508,34 km de recursos hídricos e a distância máxima do recurso hídrico até as áreas consideradas secas é de 5,25 km. De acordo com o Novo Código Florestal, disposto na Lei nº 12.727/2012, os empreendimentos construídos próximos à cursos d'água de até 10 metros de largura, naturais, perenes ou mesmo intermitentes, consideradas Áreas de Preservação Permanentes, deve se respeitar a distância mínima de 30 metros. Desta forma, as áreas com distância inferior a 30 m dos cursos d'água foram considerados inaptos. A Figura 42 mostra as distâncias e a aptidão das áreas.

Figura 42 - Mapa de distâncias (E) e aptidão por distância de recursos hídricos



Fonte: Do Autor, 2017.

5.2.1 Avaliação ponderada de fatores

A metodologia anteriormente descrita apresentou a matriz AHP como método de ponderação de fatores e seu preenchimento se deu avaliando-se os pesos e critérios definidos por autores, que indicam a relevância de cada um dos parâmetros utilizados. O valor de irradiação solar foi inferior a alguns dos parâmetros, como por exemplo declividade do terreno e distância de linhas de transmissão. Isto se deve ao fato de a escolha do local para a implantação da usina já possui boas condições solares e pouca variação nos índices na área proposta.

Quadro 6 - Matriz AHP preenchida

	Irradiação	Declividade	Uso do solo	Dist. LT	Dist. cidades	Dist. rodovias
Irradiação	1					
Declividade	1,25	1				
Uso do solo	0,75	0,5	1			
Dist. LT	2	1,25	3	1		
Dist. cidades	0,3	0,25	1	0,2	1	
Dist. rodovias	0,5	0,4	1,5	0,3	1,25	1

Fonte: Do Autor, 2017.

A matriz gerada apresentou os pesos e importância percentual de cada um dos atributos utilizados, sendo que o percentual apresentado na Tabela 10 representa sua importância para a definição das áreas mais aptas para implantação de uma USF. A avaliação da consistência indica a confiabilidade do método de análise empregado. A consistência se demonstrou aceitável, visto que apresentou 0,02. Para que a avaliação seja considerada adequada, este índice não deve ser superior a 0,1.

Tabela 9 - Importância de cada atributo

Atributo	Peso
Irradiação solar	17,85%
Declividade do terreno	23,57%
Uso e ocupação do solo	9,70%
Distância de Linhas de Transmissão	31,89%
Distância de cidades	6,94%
Distância de rodovias	10,04%

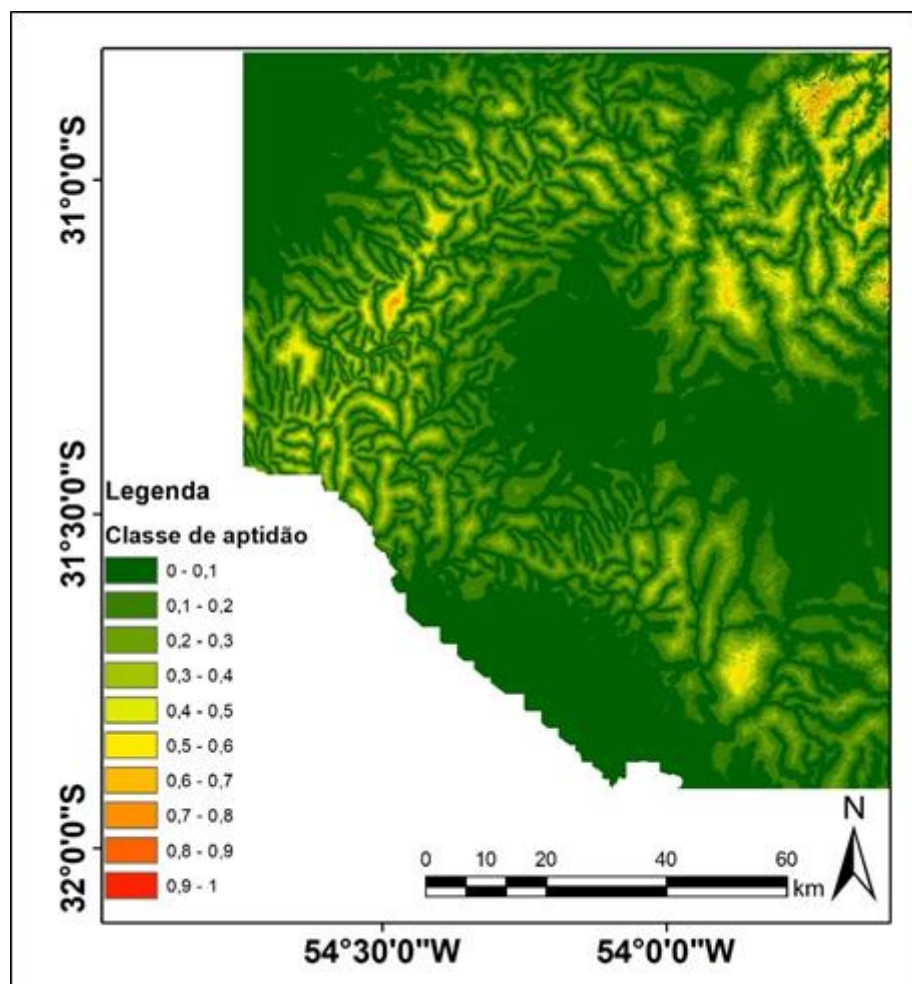
Fonte: Do Autor, 2017.

O parâmetro que apresentou maior importância nesta análise na análise foi o de distância de linhas de transmissão, seguido de declividade do terreno, irradiação solar, distância de rodovias, uso e ocupação do solo e distância de cidades.

Com os pesos definidos para cada critério, utilizou-se a álgebra de mapas, utilizando a ferramenta *weighedt sum* no *software* ArcGIS 10.3, onde multiplicou-se os mapas de atributos pelos pesos relativos obtidos pela matriz AHP. Este mapa,

multiplicado pela máscara 0-1, gerou o mapa final de aptidão de áreas para a implantação de uma USF, que pode ser visualizado na Figura 43.

Figura 43 - Mapa final de aptidão de áreas

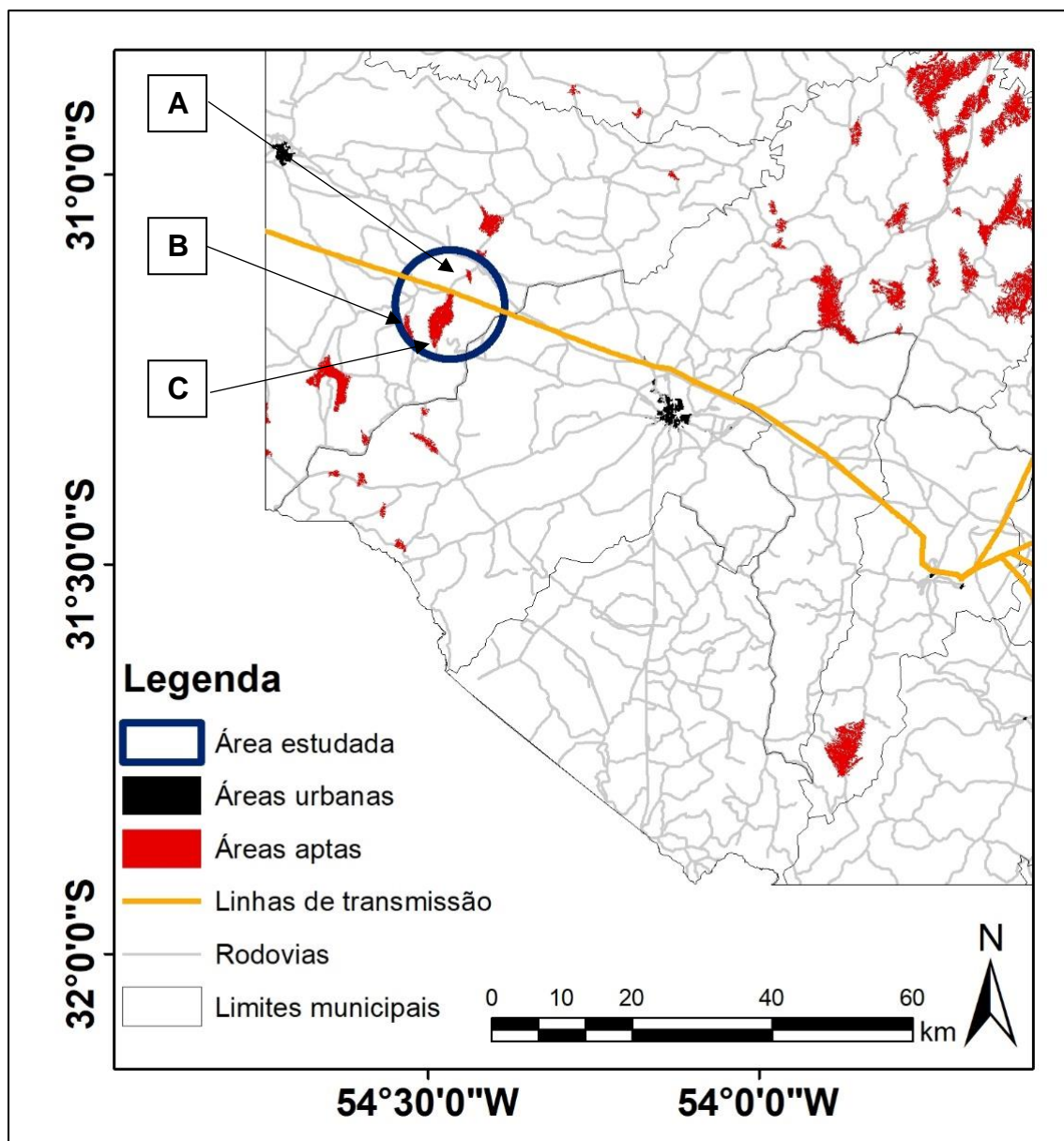


Fonte: Do Autor, 2017.

Este mapa gerou classes de aptidão variando de 0 a 0,76, ou seja, não localizou nenhuma área que apresentasse aptidão de 100%. O mapa gerado passou por uma nova reclassificação, convertendo e selecionados os polígonos com área superior a 60 hectares, área mínima necessária para a implantação de usina. A Figura 44 apresenta o mapa com as 43 áreas, totalizando 32.628,60 hectares, com as dimensões mínimas estipuladas, onde elas variam entre 61,02 e 5.505,12 hectares.

Nota-se na imagem que a linha de transmissão existente corta praticamente toda a área, de sudeste à noroeste, o que facilita a conexão em praticamente qualquer uma das áreas selecionadas. As áreas mais distantes da linha de transmissão de energia estão a 50 km e a área mais próxima encontra-se a menos de 500 metros. Além disto, nota-se a disponibilidade do sistema viário, contemplando rodovias e estradas em toda a extensão da área. A área estudada sinalizada pelo círculo na imagem é distante 32 km do município de Dom Pedrito e 37 km do município de Bagé e foi utilizada para realizar as análises mais detalhadas.

Figura 44 - Mapa final e infraestrutura básica

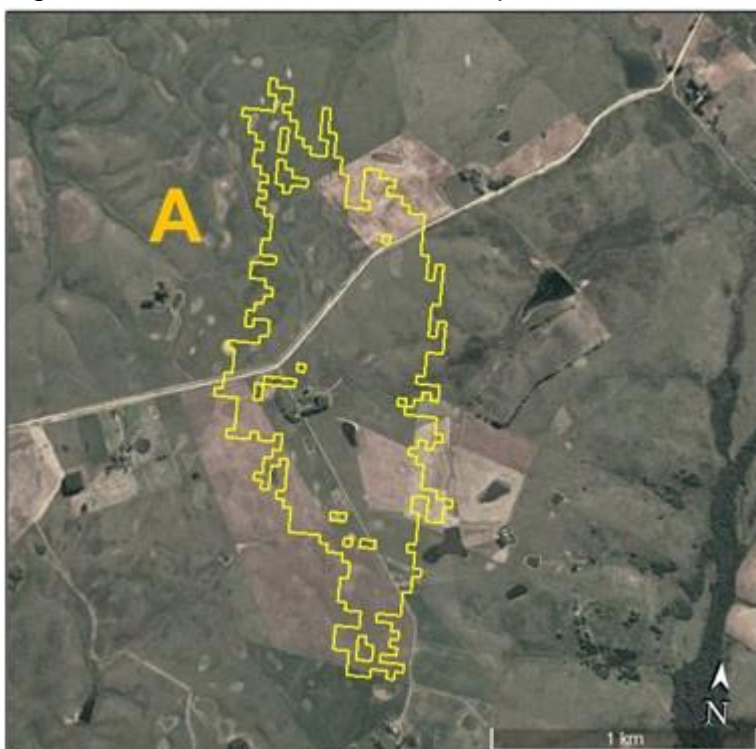


Fonte: Do Autor, 2017.

Após a verificação das áreas mais aptas geradas por meio da álgebra de mapas, fez-se a validação dos locais por meio do uso de imagens geradas pelo *software* Google Earth Pro 7.1.2.2041. As imagens verificadas apontaram boa resolução, porém, em algumas áreas notou-se a presença de culturas, como silvicultura, que não constavam anteriormente, o que demonstra que a base de uso e ocupação de solo apresentou imprecisão, muito em consequência do tempo em que esta base foi gerada. A demais base, como a de recursos hídricos, obteve bom rendimento, mantendo as áreas consideradas aptas em relativa distância.

A Figura 45 trata-se de uma área chamada de “A”, com 98,91 hectares e dispõe de estradas para acesso e distância de 2 km da linha de transmissão na direção sudoeste, porém, de acordo com as imagens, dispõe de benfeitorias e pequena área de silvicultura. Apesar disto, analisando esta área com relação ao mapa de uso e ocupação do solo, identifica-se 65,34 hectares de área de campos, correspondendo a 66,06% da área total e 33,57 hectares correspondente a uso agrícola, correspondendo a 33,94%. A declividade do terreno não supera os 9,67 %, indicando uma área de relativa planície da área.

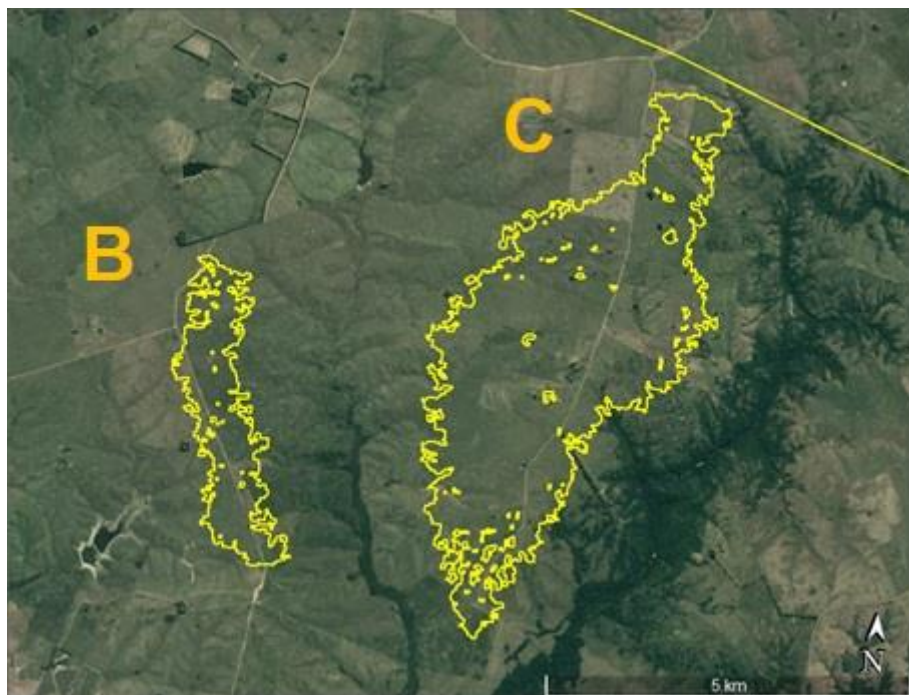
Figura 45 - Área “A” considerada apta



Fonte: Google Earth Pro 7.1.2.2041, 2017.

A Figura 46 trata-se de uma área “B”, com 281,88 hectares, distante 5 km da rede elétrica. Já a área “C” possui 1.367,73 hectares, distante menos de 500 metros da linha de transmissão, localizada a nordeste. Analisando as imagens, ambas as áreas dispõem de estradas de acesso e, aparentemente, baixa densidade de ocupação por residências ou áreas edificadas. Comparando-se com o mapa de uso e ocupação de solo, a área “B” conta com 100% de campo, já a área “C” conta com uma pequena área de capoeira, com 0,42 hectares, correspondendo a 0,03% da área, 68,30 hectares, correspondendo a 4,99% da área correspondendo a uso agrícola e 1.327,08 hectares, correspondendo a 97,03% da área correspondendo a área de campos. Com relação a declividade, a maior parte do terreno apresenta inclinação inferior a 9,98% em ambas as áreas, sinalizando a planície da área.

Figura 46 – Áreas “B” e “C” consideradas apta



Fonte: Google Earth Pro 7.1.2.2041, 2017.

As três áreas selecionadas apresentam boas condições, considerando o uso e cobertura do solo, declividade, distância de linhas de transmissão de energia elétrica e distância de estradas e rodovias. Sendo assim, estas áreas foram consideradas aptas para a implantação de uma USF, com capacidade instalada de 30 MWp.

Verificou-se o mapa de irradiação solar média para estas áreas, onde obteve-se 5,20 kWh/m².dia⁻¹. Este valor foi utilizado para o projeto da USF.

5.3. Resultado do projeto da usina solar fotovoltaica

A proposta de projeto da USF se deu pela utilização do *software* Sunny Design, desenvolvido pela SMA. Para a simulação optou-se em definir o município de Quaraí/RS, próximo à área proposta para o empreendimento.

Para atingir a potência nominal definida para o projeto, o sistema calculou o uso de 92.308 módulos fotovoltaicos da marca Canadian Solar, modelo CS6U – 325, com potência de 325 Wp. Estas placas possuem eficiência de 16,8% e área unitária de 1,95 m². Definiu-se o ângulo de 31° de inclinação dos painéis e o tipo de uso em estruturas metálicas sobre o solo.

O programa propôs a utilização dos inversores conforme o melhor rendimento para funcionamento nas condições que foram indicadas, como localização, dados de temperatura máxima e mínima, inclinação dos painéis, estrutura de fixação, orientação e tipo de inversores, no caso, centrais. Desta forma, foi proposta a utilização de 29 inversores, destes 28 do modelo SC 900CP XT, e um do modelo SC 1000CP XT. Os inversores SC 900CP XT possuem potência ativa máxima de 990 kW, com rendimento de 98%. Estes 28 inversores receberiam 89.040 painéis solares em 159 *strings* de 20 painéis cada. Já o inversor SC 1000CP XT, possui potência máxima ativa de 1100 kW, com rendimento de 96,9%. Este inversor receberia 3.268 painéis solares em 172 *strings* com 19 painéis solares cada.

A simulação gerada pelo programa apontou a produção média anual de 47.518,22 MWh, com uma produtividade de 1.584 kWh/kWp. Já o cálculo utilizado na Equação 14 apontou a produção anual de 48.649,59 MWh, com produtividade anual de 1.621,65 kWh/kWp. A diferença entre a produção simulada com a calculada foi de apenas 2,38%. Peraza (2012) indicou a produtividade para sistemas fotovoltaicos no Rio Grande do Sul é de aproximadamente 1.380 kWh/kWp, 17,51% inferior ao que foi calculado. No estudo, a autora indicou a região Nordeste do Estado como sendo a que conta com a maior produtividade, diferente do que foi obtido neste trabalho,

obtendo produtividade superior além de se situar na região da Campanha Meridional do Rio Grande do Sul. Isto pode ser explicado pelo fato de a autora ter utilizado ângulo fixo, de 25°, para todas as localidades em que foram coletados os dados de irradiação solar.

A projeção de geração anual de energia elétrica aponta que esta USF poderia suprir cerca de 0,16% da demanda do Estado. Já com relação a matriz elétrica estadual, a usina representaria 0,31%.

Considerando o consumo anual de energia elétrica no Rio Grande do Sul na casa de 30.000 GWh, assim como a estimativa de produção da USF dimensionada, seria necessário ocupar uma área total de 37.500 hectares. A região mais apta estudada, que apresentou 43 áreas possíveis de serem aproveitadas possui 32.628,60 hectares, ou seja, área suficiente para gerar 87,01% da energia elétrica consumida no Estado.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou o potencial de produção de energia elétrica por meio de fonte solar fotovoltaica no Rio Grande do Sul. Além de indicar as regiões com maiores índices de irradiação solar, por meio de dados climatológicos obtidos do INMET, apontou as alternativas de locais com maior aptidão geomorfológica e de infraestrutura para o aproveitamento desta fonte limpa, silenciosa e renovável de energia. Demonstrou, ainda, o real potencial de geração e a expressiva capacidade de contribuição na matriz elétrica do Estado.

Os dados de irradiação solar no plano inclinado em cada uma das estações meteorológicas apontaram as regiões de Bagé, Quaraí e Santiago como as com os maiores índices, superiores a $5,20 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}^{-1}$, superiores aos observados em alguns Leilões de Energia de Reserva realizados entre os anos de 2014 e 2015, o que indica que o estado do Rio Grande do Sul possui notável viabilidade para o aproveitamento desta fonte de energia em larga escala.

Estudando o traçado atual das linhas de transmissão de energia elétrica da Rede Básica, considerada como fator econômico mais importante a ser observado para a escolha do local de implantação de uma USF, indicou-se as áreas para o aproveitamento desta fonte. Realizando a avaliação de múltiplos critérios, como declividades, uso e ocupação de solo, distâncias de rodovias e cidades, isolou-se áreas aptas e áreas de restrição, como áreas de florestas, cidades e recursos hídricos e obteve-se áreas, totalizando mais de 32.628 hectares, que reuniram as características mais favoráveis.

As três áreas isoladas e estudadas apresentaram declividade inferior a 10%, indicando as condições aptas para a implantação da USF. Estas áreas apresentaram uso do solo predominante de campos e uso agrícola, o que indica a facilidade de implantação e o baixo impacto ambiental da instalação.

O dimensionamento da USF demonstrou o alto potencial de geração de energia elétrica por meio do aproveitamento energético solar. Os 30 MWp propostos indicaram um potencial de produção anual de 48.649,59 MW, representando 0,16% do consumo estadual de energia elétrica. Considerando-se a utilização total da área apta, a geração de energia elétrica por fonte solar poderia suprir mais de 87% da demanda Estadual, o que indica seu grande potencial e remete a reavaliação da necessidade de implantação de novas usinas que utilizam fontes de energias não renováveis ou mesmo novas hidrelétricas.

A inserção de fonte de energia solar fotovoltaica de grande escala na matriz elétrica estadual demonstra-se ser viável tecnicamente e, de acordo com outros estudos já desenvolvidos, apresenta competitividade financeira em relação às demais regiões do País. Além de auxiliar na disponibilidade e qualidade da energia, pode auxiliar na redução de consumo de combustíveis fósseis. Combustíveis estes que colaboram com o aumento da degradação ambiental, principalmente na sua extração e transporte.

Há de se avaliar as consequências e impactos da substituição de uso do solo na região que hoje tem como finalidade básica a produção primária, por sistemas de produção de energia elétrica. A promoção do desenvolvimento tecnológico e socioeconômico pode representar melhoria nas condições de vida da população, além de promover uma nova fonte de renda para a população e impostos para o poder público.

REFERÊNCIAS

ÁDÁM, Gábor; BAKSAI-SZABÓ, Kristóf; KISS, P. Energy production estimating of photovoltaic systems. In: **International Conference on Renewable Energies and Power Quality** (ICREPQ 2012), Santiago de Compostela, Spain. 2012.

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Resolução Normativa Nº 481, de 17 de Abril de 2012**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012481.pdf>>. Acesso em 30 de mai. 2017.

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Banco de Informação de Geração**. Disponível em: <www2.aneel.gov.br>. Acesso em 06 de mai. 2017.

_____. Presidência da República. **Decreto nº 2.655**, de 02 de julho de 1998.

_____. Presidência da República. **Lei nº 9.648**, de 27 de maio de 1998.

ANDRADE, Airton Cabral de. **Análise e simulação da distribuição de temperaturas em módulos fotovoltaicos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Porto Alegre, 2008.

ANTONIOLLI, Andriago Filippo Gonçalves. **Avaliação do desempenho de geradores solares fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2015.

BARBOSA FILHO, Wilson Pereira et al. **EXPANSÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL: IMPACTOS AMBIENTAIS E POLÍTICAS PÚBLICAS**. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v. 4, p. 628-642, 2015.

BARROS, Luisa Valentim. **Avaliação de modelos de negócio para energia solar fotovoltaica no mercado de distribuição brasileiro**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014

BECKER, Elsbeth Léia Spode; MÁRCIA, Nunes Piccini. **RELEVO DO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL, E SUA REPRESENTAÇÃO EM MAQUETE**. Revista Percurso, v. 4, n. 2, p. 113-132, 2012.

BERGAMASCHI, Homero et al. Boletins agrometereológicos da estação experimental agrônômica da UFRGS. **Editora UFRGS**, Porto Alegre, 8p, 2013.

BIANCHINI, Cleberton Diego. **Determinação de áreas mais indicadas para implantação de unidades de conservação no Vale do Taquari - RS**. 2015.

BORGES, Ane Caroline Pereira et al. ENERGIAS RENOVÁVEIS: UMA CONTEXTUALIZAÇÃO DA BIOMASSA COMO FONTE DE ENERGIA. **Renewable energy: a contextualization of the biomass as power supply**. REDE-Revista Eletrônica do PRODEMA, v. 10, n. 2, 2017.

BORN, Viviane. **Avaliação da aptidão de áreas para a instalação de aterro sanitário com o uso de ferramentas de apoio à decisão por múltiplos critérios**. 2014. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 20 mar. 2014.

BORO, Sara Regina. **Análise da complementaridade entre fontes renováveis não convencionais como mecanismo de proteção para mitigação de riscos de mercado**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 201

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 9.427**, de 26 de dezembro de 1996.

BRASIL, Novo Código Florestal. **Lei n 12.651**, de 25 de maio de 2012.

BRASIL, A utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica. **Lei nº 11.428**, de 22 de dezembro de 2006.

BRITO, Mariana Madruga de. **Geoprocessamento aplicado ao mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos no município de Porto Alegre, RS**. Tese de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. POrto Alegre, 2014.

BURIOL, Galileo Adeli et al. Clima e vegetação natural do Estado do Rio Grande do Sul segundo o diagrama climático de Walter e Lieth. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 2, p. 91-100, abr-jun, 2007.

CAGLAYAN, Nuri; ERTEKIN, Can; EVRENDILEK, Fatih. Spatial viability analysis of grid-connected photovoltaic power systems for Turkey. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 56, p. 270-278, 2014.

CAMPOS, Igor Balteiro Pereira de. Análise comparativa entre diferentes métodos de interpolação para estimativa da temperatura média do ar no Brasil. In: **XXXI Jornadas Científicas de la AME**, 2010.

CAPELETTO, Gilberto José; MOURA, GHZ de. **Balanço energético do Rio Grande do Sul 2015: ano base 2014**. Porto Alegre: Grupo CEEE/Secretaria de Infra-Estrutura e Logística do Rio Grande do Sul, 2015.

CARRIÓN, J. Arán et al. Environmental decision-support systems for evaluating the carrying capacity of land areas: Optimal site selection for grid-connected photovoltaic

power plants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 9, p. 2358-2380, 2008.

CARUZZO, Amaury; NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. Avaliação da eficiência energética na iluminação pública: proposta de modelagem considerando a variabilidade climática. **Revista Produção Online**, v. 15, n. 4, p. 1399-1425, 2015.

CATERINA, Francesco Eduardo Guimarães et al. **Ferramenta de auxílio à tomada de decisão no processo de escolha da tecnologia fotovoltaica**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, 2015.

CHARABI, Yassine; GASTLI, Adel. PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation. **Renewable Energy**, v. 36, n. 9, p. 2554-2561, 2011.

CUSTÓDIO, Ronaldo dos Santos. Energia eólica para produção de energia elétrica. Rio de Janeiro: **Eletrobrás**, 2009.

DARWICHE, Talita Jamil. **Déficit da geração hídrica e a repactuação do risco hidrológico no setor elétrico brasileiro: uma análise sob a perspectiva da teoria dos grupos de interesse**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo/SP, 2016.

DE CARVALHO, Daniel Fonseca et al. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos limitados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 1, p. 1-11, 2015.

Departamento Autônomo de Estradas e Rodagem - DAER. **Rodovias**. Disponível em <<http://www.daer.rs.gov.br>> Acessado em 25 de maio de 2017.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. **Solar engineering of thermal processes**. 1980.

EASTMAN, J. Ronald. **IDRISI Kilimanjaro: guide to GIS and image processing**. Worcester, MA: Clark Labs, Clark University, 2003.

EASTMAN, J. Ronald. **Idrisi Para Windows: Version 2.0**, Enero 1997. Tutorial Exercises. Clark University, 1997.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balanço Energético Nacional 2016 - Ano base 2015: Relatório Síntese**. Rio de Janeiro, 2016.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Ministério de Minas e Energia – **“Instruções para Solicitação de Cadastramento e Habilitação Técnica com vistas à participação nos Leilões de Energia Elétrica - Empreendimentos Fotovoltaicos”**. Nota Técnica EPE DEE RE 065/2013-r2, p. 40, 23 de mar. 2016.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Ministério de Minas e Energia – **“Expansão da Geração 2º Leilão de Energia de Reserva de 2015 - Participação dos Empreendimentos Solares Fotovoltaicos: Visão Geral”**, EPE-DEE-NT-023/2016-r0, p. 28, 24 de fevereiro de 2016.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Ministério de Minas e Energia - **“Leilão de Energia de Reserva de 2014 - Participação dos Empreendimentos Solares**

Fotovoltaicos: Visão Geral", EPE-DEE-NT-150/2014-r0, p. 22, 21 de novembro de 2014.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Ministério de Minas e Energia - **"1º Leilão de Energia de Reserva de 2015 - Participação dos Empreendimentos Solares Fotovoltaicos: Visão Geral"**, EPE-DEE-127/2015-r0, p. 26, 24 de setembro de 2015.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024** / Ministério de Minas e Energia. Brasília: MME/EPE, 2015

ENGIE. Disponível em:
<http://www.engieenergia.com.br/wps/portal/internet/imprensa/press-release/conteudos/Release_Operacao_Usina_Solar>. Acesso em: 19 de abr. 2017.

ESPÍNDOLA, Marcos Aurélio. **As transterritorializações na bacia do Rio Uruguai e o alagamento sistemático de coletividades**. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Florianópolis, 2009.

ETCHEVERRY, Maria Soledad. PRIVATIZAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO: IMPACTOS SOBRE O TRABALHO. **Revista Labor**, v. 1, n. 1, p. 185-199, 2017.

FALCÃO, Vivienne Denise. **Fabricação de células solares de CdS/CdTe**. Tese de Doutorado. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2005.

FARIAS, Leonel Marques; SELLITTO, Miguel Afonso. Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. **Revista Liberato**, v. 12, n. 17, p. 07, 2011.

FERRAZ, Pedro George Prescott. **Aplicativo para a avaliação multicritério de projetos de geração para atendimento a comunidades isoladas**. 2008. 102 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica)-Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

FREITAS, Marcos Aurélio Vasconcelos de; SOITO, João Leonardo da Silva. Energia e recursos hídricos. **Parcerias Estratégicas**, v. 13, n. 27, p. 177-216, 2010.

Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler - RS - FEPAM. Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/guaiba.asp>>. Acesso em: 30 de maio de 2017.

GOLDEMBERG, José. Energia e desenvolvimento sustentável. São Paulo: **Blucher**, 2012.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. Energias renováveis: um futuro sustentável. **Revista USP**, v. 72, p. 6-15, 2007.

HASENACK, Heinrich; WEBER, Eliseu. (org.). **Base cartográfica vetorial contínua** IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2010**. Disponível em: <http://censo2010.ibge.gov.br>. Acesso em: 23 de jun. 2017.

JHANGIRI, Mehdi et al. Finding the best locations for establishment of solar-wind power stations in Middle-East using GIS: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 66, p. 38-52, 2016.

KAUFMANN, Gustavo Vinícius. **Avaliação do potencial de geração solar fotovoltaica e análise em tempo real da operação de um painel fotovoltaico instalado na cidade de Lajeado/RS**. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Universitário UNIVATES. Lajeado, 2014

KRENZINGER, Arno; BUGS, Rodrigo Carvalho. Radiasol2: Software para sintetizar dados de radiação solar. In: **IV Conferência Latino Americana de Energia Solar (IV ISES CLA) e XVII Simpósio Peruano de Energia Solar (XVII-SPES)**, Cuzco. 2010.

KUINCHTNER, Angélica; BURIOL, Galileo Adeli. Clima do Estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia| Naturais e Tecnológicas**, v. 2, n. 1, p. 171-182, 2016.

LEE, Ga Rick; FREARSON, Lyndon; RODDEN, Paul. An assessment of photovoltaic modelling software using real world performance data. In: **26th European PV Solar Energy Conference**. 2011.

LUCIANO, Ana Cláudia dos Santos. **Modelagem da distribuição da radiação solar incidente na superfície do terreno a partir de dados SRTM – São José dos Campos**: INPE, 2015.

MACARI, Anelise Christine. A rede de PCHS em Santa Catarina: fatores políticos e econômicos. In: **VIII Seminário Internacional de Investigación en Urbanismo, Barcelona-Balneário Camboriú**, Junio 2016. Departament d'Urbanisme i Ordenació del Territori. Universitat Politècnica de Catalunya, 2016.

MALERBA, Julianna. Alternativas renováveis, nem sempre sustentáveis: novas energias e velhos paradigmas. **Energia y equidad**, v. 2, p. 20-29, 2012.

MARCZEWSKI, Júnior Mateus. **Energias renováveis: tema gerador no ensino de química. 2012**. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Foz do Iguaçu, 2012.

MARTINAZZO, Claodomir Antonio. **Modelos de estimativa de radiação solar para elaboração de mapas solarimétricos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. 2004.

MELLO, CR de et al. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, 2003.

MIRANDA, Renan Maciel. **Projeto de usina de geração fotovoltaica de larga escala em terra no Brasil**. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal/RN, 2016.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, nov. 2015.

MORAES, Indiara Bruna Costa Moura; RIBEIRO, Gilberto Pessanha; LARENTIS, Dante Gama. **Mapeamento digital de áreas suscetíveis a escorregamento na parte continental do município de Angra Dos Reis-RJ**. Dissertação de Mestrado - Universidade do Estado do Rio de Janeiro - 2012.

MOREIRA, Leandro Caixeta. **Um novo mercado de energia elétrica para o Brasil**. Dissertação de Mestrado - Economia do Setor Público. Universidade de Brasília, 2016.

NOVAK, Matheus Vercka. **Análise de modelos matemáticos de temperatura de módulos fotovoltaicos e avaliação energética a partir de dados da Casa Solar Eficiente**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina. Campus Araranguá. Engenharia de Energia. 2016

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA (ONSa). **O que é o SIN? - sistema interligado nacional**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx>. Acesso em: 06 mar. 2017.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA (ONSb). **O que é Rede Básica?** Disponível em: <http://www.ons.org.br/sala_imprensa/faq.aspx>. Acesso em: 29 mar. 2017.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA (ONSd). **Dados Relevantes 2015**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/biblioteca_virtual/publicacoes/DADOS_2015/html/7-2.html>. Acesso em: 18 mai. 2017.

PACHECO, Susi Missel et al. **Biogeografia de quirópteros da Região Sul**. Ecology, v. 17, p. 627-646, 2001.

PERAZA, Danielle Goulart. **Estudo de viabilidade da instalação de usinas solares fotovoltaicas no Estado do Rio Grande do Sul**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. 2013

PEREIRA, Enicio Bueno et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. INPE, 2006.

PEREIRA, Lauro Charlet; LOMBARDI NETO, Francisco. Avaliação da aptidão agrícola das terras: proposta metodológica. **Embrapa Meio Ambiente-Documents (INFOTECA-E)**, 2004.

PINHO, João Tavares et al. **Sistemas Híbridos-Soluções Energéticas para a Amazônia**. MME, Brasília, 2008.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Cepel-Cresesb, 2014.

PONS, Xavier; NINYEROLA, Miquel. Mapping a topographic global solar radiation model implemented in a GIS and refined with ground data. **International Journal of Climatology**, v. 28, n. 13, p. 1821-1834, 2008.

POTTMAIER, D. et al. The Brazilian energy matrix: from a materials science and engineering perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 678-691, 2013.

RAMPINELLI, Giuliano Arns et al. Mercado Fotovoltaico no Brasil: Implantação de Políticas Governamentais e Marcos Regulatórios. In: **ASADES 2013-XXXVI Reunión de Trabajo-Tucuman**. 2013.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão. **Atlas Socioeconômico: Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2014.

ROCKERT, Alan dos Santos. **Uma análise da volatilidade do setor elétrico brasileiro na crise de 2012: um estudo empírico utilizando Modelos Garch**. Monografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

RONDINELLI, Francisco; DA SILVA, Pedro Maffia. Avaliação da Matriz Elétrica Brasileira com Foco em Aspectos Econômicos, Ambientais e Sociais. **Revista Científica da FACERB**, v. 2, n. 2, p. 06-22, 2015.

ROSSATO, Maíra Suertegaray. **Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Porto Alegre, 2011.

RÜTHER, Ricardo. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Editora UFSC, 2004.

SAATY, Thomas L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **European journal of operational research**, v. 48, n. 1, p. 9-26, 1990.

SAATY, Thomas L. Theory and applications of the analytic network process: decision making with benefits, opportunities, costs, and risks. **RWS publications**, 2005.

SÁNCHEZ-LOZANO, Juan M. et al. Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 24, p. 544-556, 2013.

SANTOS, Bruno António de Oliveira et al. **Previsão de produção de centrais solares a muito curto prazo**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica de Computadores. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.

SANTOS, Daniel Martins dos. **Zoneamento das áreas suscetíveis a movimentos de massa, enxurradas e inundações no município de Marques de Souza – RS**. 2015. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 27 nov. 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10737/943>>.

SCHMIDT, Tanara. **Seleção de área e dimensionamento de aterro sanitário para o consórcio público intermunicipal para assuntos estratégicos do G8 – CIPAE G8**. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 15 dez. 2016.

SEYR JUNIOR, Ubirajara. **Avaliação de programas computacionais para dimensionamento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. 2013. 108 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

SILVA, A. S. A.; SILVA, J. R. S. ; FERREIRA, D. V. S. ; STOSIC, T. . **Estudo da Complexidade das Temperaturas Máximas e Mínimas Diárias no Nordeste Brasileiro**. In: **58ª Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria, 2013, Campina Grande - PB**. Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria, 2013.

SILVA, Alexander Marques; VIEIRA, Rogério Márcio Fonseca. Energia eólica: conceitos e características basilares para uma possível suplementação da matriz energética brasileira. **Revista Direito Ambiental e Sociedade**, v. 6, n. 2, 2016.

SILVA, Demóstenes Barbosa da. **Produtividade ambiental das fontes de energia**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Energia - Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo. São Paulo/SP, 2016.

SILVA, Diva Martins Rosas e. **Aplicação do Método AHP para Avaliação de Projetos Industriais**. Dissertação de mestrado apresentada como requisito para obtenção de título de mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da PUC-Rio. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

SILVA, Felipe Vargas. **Proposta de um índice de desempenho ambiental para a mineração a céu aberto**. Tese de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre, 2014.

SILVA, Neilton F. **Energias Renováveis na expansão do setor elétrico brasileiro: o caso da energia eólica**. Rio de Janeiro: Synergia, 2015.

SILVA, Rômulo Lucena. Viabilidade do uso da energia solar no Brasil. Especialização em Análise Ambiental e Desenvolvimento sustentável - Centro Universitário de Brasília. 2012.

SIMIELLI, Maria Elena. **Geoatlas**. São Paulo: Ática. 2009.

SPALENZA, Denise Colly et al. Influência da Poluição Atmosférica sobre o Desempenho de Módulos Fotovoltaicos em Vitória, ES. **Revista Científica Faesa**, p. 19, 2013.

SUZIGAN, Kelly Rosana et al. **A transição para uma matriz energética limpa: os avanços na tecnologia solar**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, 2015.

TELLO ORTÍZ, Elvis Richard. **Sistemas fotovoltaicos e eólicos: metodologia para análise da complementaridade espacial-temporal com aplicação no dimensionamento e análise de risco financeiro**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014

TIEZZI, Rafael de Oliveira et al. **Variabilidade hidroclimatológica e seus efeitos no suprimento de energia elétrica do sistema interligado nacional**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, 2015

TOLMASQUIM, Maurício Tiomno. **Energia Renovável. Hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica**. Empresa de Pesquisa Energética–EPE. Rio de Janeiro, 2016.

TONEZER, Cristiane et al. O Estado, o mercado e as usinas hidrelétricas na região oeste catarinense. **Revista Grifos**, v. 25, n. 41, p. 286-303, 2017.

TRENBERTH, Kevin E.; FASULLO, John T.; KIEHL, Jeffrey. Earth's global energy budget. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 90, n. 3, p. 311-323, 2009.

UFRGS-IB-Centro de Ecologia. **Mapeamento da cobertura vegetal do Bioma Pampa: Ano-base 2009**. Porto Alegre, 2016.

UYAN, Mevlut. GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region, Konya/Turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, p. 11-17, 2013.

VANACÔR, Roberto Nunes. **Sensoriamento Remoto e geoprocessamento aplicados ao mapeamento das áreas susceptíveis a movimentos de massa na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul**. Tese de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia. Porto Alegre, 2006.

VESCOVI, P. V. S. ; MENEGÁZ, P. J. M. . Análise Técnico-Econômica de Implementação de um Sistema de Geração Elétrica Fotovoltaica Aplicada para Cargas de Refrigeração. In: **XX Congresso Brasileiro de Automática**, 2014, Belo Horizonte. Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática, 2014.

VICARI, Matheus Boni. **Uso de SIG e Análise Multicritério para Levantamento do Potencial de Implantação de Usinas Eólica e Solar no Rio Grande do Sul**. Trabalho de conclusão de curso. Engenharia Ambiental – Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo/RS, 2012.

VIEIRA, Luciano; PICULLI, Francisco José. **Meteorologia e climatologia agrícola**. 2012.

WEBER, E.; HASENACK, H.; FERREIRA, C.J.S.. **Adaptação do modelo digital de elevação do SRTM para o sistema de referência oficial brasileiro e recorte por unidade da federação**. Porto Alegre, UFRGS Centro de Ecologia, 2004.

WERNER, Deborah. Geração de energia elétrica e padrão de acumulação: uma análise a partir da cadeia societária de hidrelétricas no Brasil. **IV Encontro Internacional Ciências Sociais e Barragens**. Chapecó/SC, 2016.

WU, Wei et al. Spatial estimation of monthly mean daily sunshine hours and solar radiation across mainland China. **Renewable energy**, v. 57, p. 546-553, 2013.

ZILES, Roberto; BENEDITO, Ricardo. Panorama das aplicações da energia solar fotovoltaica. GOLDEMBERG, J. et al. **Energias renováveis**. São Paulo: Blucher, p. 33-42, 2012.